

PROJECTION OPTICAL SYSTEM AND EXPOSURE DEVICE EQUIPPED WITH THE SAME

Publication number: JP2002116382

Publication date: 2002-04-19

Inventor: KUMAGAI SATORU

Applicant: NIPPON KOGAKU KK

Classification:

- international: G03F7/20; G03F7/20; (IPC1-7): G02B17/00; G03F7/20; H01L21/027

- european: G03F7/20T16

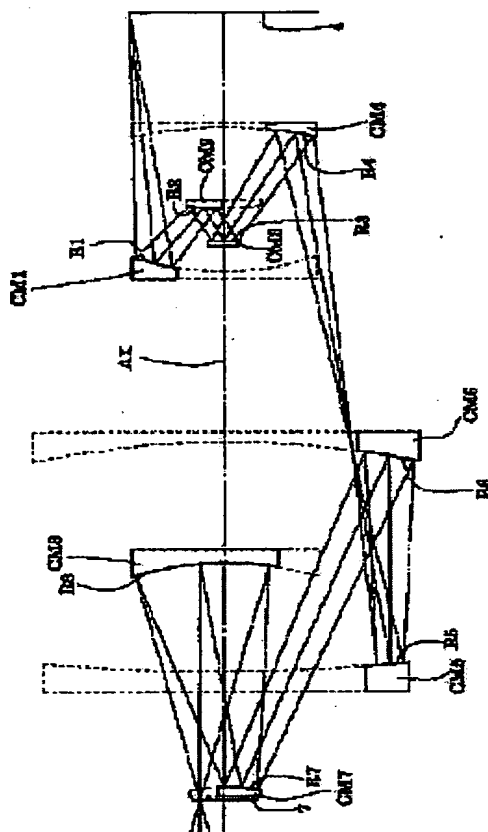
Application number: JP20000305734 20001005

Priority number(s): JP20000305734 20001005

Report a data error here

Abstract of JP2002116382

PROBLEM TO BE SOLVED: To obtain a reflection type projection optical system not only realizing the complete compensation of aberration between an object surface and an entrance pupil but also realizing the excellent compensation of the aberration of an entire optical system. **SOLUTION:** This projection optical system forms the image of a first surface (4) on a second surface (7). The optical system is equipped with a first reflection surface (R1), a second reflection surface (R2), a third reflection surface (R3), a fourth reflection surface (R4), a fifth reflection surface (R5), a sixth reflection surface (R6), a seventh reflection surface (R7) and a eighth reflection surface (R8). The position of the entrance pupil of the projection optical system is set nearer to the second surface side than the vicinity of the first surface side of the second reflection surface along an optical path from the first surface to the second surface.



Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide

1/3

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2002-116382

(P2002-116382A)

(43) 公開日 平成14年4月19日 (2002. 4. 19)

(51) IntCl. ⁷	識別記号	F I	テームト [*] (参考)
G 0 2 B 17/00		G 0 2 B 17/00	A 2 H 0 8 7
G 0 3 F 7/20	5 0 3	G 0 3 F 7/20	5 0 3 2 H 0 9 7
H 0 1 L 21/027		H 0 1 L 21/30	5 3 1 A 5 F 0 4 6

審査請求 未請求 請求項の数9 O L (全 21 頁)

(21) 出願番号 特願2000-305734(P2000-305734)

(22) 出願日 平成12年10月5日 (2000. 10. 5)

(71) 出願人 000004112

株式会社ニコン

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号

(72) 発明者 熊谷 悟

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内

(74) 代理人 100095256

弁理士 山口 孝雄

Fターム (参考) 2H087 KA21 TA02 TA06

2H097 AA02 AB09 BA10 CA15 EA01

GB00 LA10

5F046 GA03 GA06 GB01 GB07 GC03

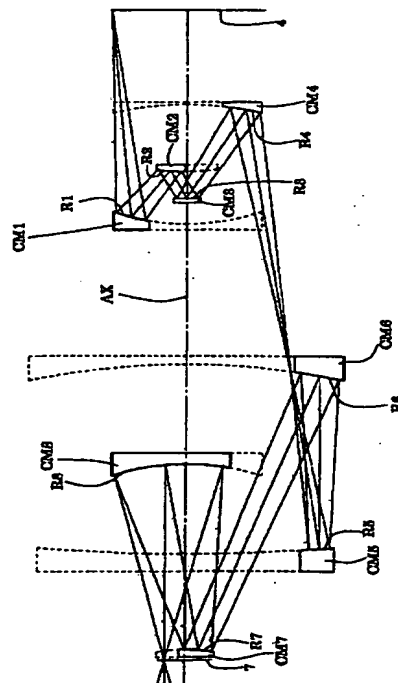
GD10

(54) 【発明の名称】 投影光学系および該投影光学系を備えた露光装置

(57) 【要約】

【課題】 物体面と入射瞳との間で十分な収差補正を行うことができ、ひいては光学系全体の収差補正を良好に行うことのできる反射型の投影光学系。

【解決手段】 第1面(4)の像を第2面(7)上に形成する投影光学系。第1反射面(R1)と、第2反射面(R2)と、第3反射面(R3)と、第4反射面(R4)と、第5反射面(R5)と、第6反射面(R6)と、第7反射面(R7)と、第8反射面(R8)とを備えている。投影光学系の入射瞳位置が、第1面から第2面への光路に沿って、第2反射面の第1面側の近傍よりも第2面側に設定されている。



FP04-0466-00WO -N1
05.4.05
SEARCH REPORT

【特許請求の範囲】

【請求項1】 第1面の像を第2面上に形成する投影光学系において、

前記第1面からの光を反射するための第1反射面と、

前記第1反射面で反射された光を反射するための第2反射面と、

前記第2反射面で反射された光を反射するための第3反射面と、

前記第3反射面で反射された光を反射するための第4反射面と、

前記第4反射面で反射された光を反射するための第5反射面と、

前記第5反射面で反射された光を反射するための第6反射面と、

前記第6反射面で反射された光を前記第2面に向けて反射するための第7反射面とを備え、

前記投影光学系の入射瞳位置が、前記第1面から前記第2面への光路に沿って、前記第2反射面の第1面側の近傍よりも第2面側に設定されていることを特徴とする投影光学系。

【請求項2】 前記入射瞳位置は、前記第1面から前記第2面への光路に沿って、前記第2反射面の第1面側の近傍と前記第3反射面の第2面側の近傍との間の光路中に設定されていることを特徴とする請求項1に記載の投影光学系。

【請求項3】 前記入射瞳位置が前記第1面から前記第2面への光路に沿って前記第2反射面の第1面側の近傍にあるとき、

光軸と像点とを含む平面内において、光軸に対して垂直な方向にy座標を、光軸に対して像点と同じ側が正になるように設定し、

前記平面内において、最大開口数の光線と前記第2反射面との交点のy座標値を y_a および y_b ($y_a > y_b$) とそれぞれ定義すると、

$$-1 \leq \log_e \{ - (y_a / y_b) \} \leq 1$$

の条件を満足することを特徴とする請求項1または2に記載の投影光学系。

【請求項4】 前記入射瞳位置は、前記第1面から前記第2面への光路に沿って、前記第2反射面上または前記第2反射面よりも第2面側に設定されていることを特徴とする請求項1に記載の投影光学系。

【請求項5】 前記第6反射面は、前記第4反射面と前記第5反射面との間に配置され、

前記第4反射面で反射されて前記第5反射面へ向かう光線が前記第6反射面の仮想延長面を通過する位置の光軸からの距離が、前記第6反射面で反射される光線の前記第6反射面上における位置の光軸からの距離よりも小さく設定されていることを特徴とする請求項1乃至4のいずれか1項に記載の投影光学系。

【請求項6】 前記第1反射面乃至前記第7反射面は、

単一の光軸に沿って配置されていることを特徴とする請求項1乃至5のいずれか1項に記載の投影光学系。

【請求項7】 マスクを照明するための照明系と、前記マスクのパターンを感光性基板上へ投影露光するための請求項1乃至6のいずれか1項に記載の投影光学系とを備えていることを特徴とする露光装置。

【請求項8】 前記照明系は、露光光としてX線を供給するための光源を有し、

前記投影光学系に対して前記マスクおよび前記感光性基板を相対移動させて、前記マスクのパターンを前記感光性基板上へ投影露光することを特徴とする請求項7に記載の露光装置。

【請求項9】 請求項7または8に記載の露光装置により前記マスクのパターンを前記感光性基板上に露光する露光工程と、前記露光工程により露光された前記感光性基板を現像する現像工程とを含むことを特徴とするマイクロデバイスの製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、投影光学系および該投影光学系を備えた露光装置に関し、例えばX線を用いてミラープロジェクション方式によりマスク上の回路パターンを感光性基板上に転写するX線投影露光装置に好適な反射型の投影光学系に関するものである。

【0002】

【従来の技術】 従来、半導体素子などの製造に使用される露光装置では、マスク（フォトリソ）上に形成された回路パターンを、投影光学系を介して、ウェハのような感光性基板上に投影転写する。感光性基板にはレジストが塗布されており、投影光学系を介した投影露光によりレジストが感光し、マスクパターンに対応したレジストパターンが得られる。

【0003】 ここで、露光装置の解像力 W は、露光光の波長 λ と投影光学系の開口数 NA とに依存し、次の式(a)で表される。

$$W = k \cdot \lambda / NA \quad (k: \text{定数}) \quad (a)$$

【0004】 したがって、露光装置の解像力を向上させるためには、露光光の波長 λ を短くするか、あるいは投影光学系の開口数 NA を大きくすることが必要となる。一般に、投影光学系の開口数 NA を所定値以上に大きくすることは光学設計の観点から困難であるため、今後は露光光の短波長化が必要となる。たとえば、露光光として、波長が248nmのKrFエキシマレーザーを用いると0.25 μ mの解像力が得られ、波長が193nmのArFエキシマレーザーを用いると0.18 μ mの解像力が得られる。露光光としてさらに波長の短いX線を用いると、例えば波長が13nmで0.1 μ m以下の解像力が得られる。

【0005】 ところで、露光光としてX線を用いる場合、使用可能な透過光学材料および屈折光学材料がなく

なるため、反射型のマスクを用いるとともに、反射型の投影光学系を用いることになる。従来、露光光としてX線を用いる露光装置に適用可能な投影光学系として、たとえば4枚～8枚の反射ミラーから構成された反射光学系が種々提案されている。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、4枚～6枚の反射ミラーから構成された従来の投影光学系では、反射ミラーの枚数が少ないため、十分な収差補正を行うことができないという不都合があった。また、8枚の反射ミラーから構成された従来の投影光学系では、マスクから感光性基板への光路に沿って、光学系の入射瞳が第2反射面（マスクからの光が第2番目に入射する反射ミラー）よりもかなりマスク側に配置されている。このため、物体面であるマスク面と入射瞳との間で十分な収差補正を行うことができず、ひいては光学系全体の収差補正を良好に行うことができないという不都合があった。

【0007】本発明は、前述の課題に鑑みてなされたものであり、物体面と入射瞳との間で十分な収差補正を行うことができ、ひいては光学系全体の収差補正を良好に行うことのできる反射型の投影光学系を提供することを目的とする。また、本発明の投影光学系を露光装置に適用することにより、たとえば露光光としてX線を用いて大きな解像力を確保することのできる露光装置を提供することを目的とする。さらに、大きな解像力を有する本発明の露光装置を用いて、良好な露光条件のもとで、高精度なマイクロデバイスを製造することのできるマイクロデバイス製造方法を提供することを目的とする。

【0008】

【課題を解決するための手段】前記課題を解決するために、本発明の第1発明では、第1面の像を第2面上に形成する投影光学系において、前記第1面からの光を反射するための第1反射面と、前記第1反射面で反射された光を反射するための第2反射面と、前記第2反射面で反射された光を反射するための第3反射面と、前記第3反射面で反射された光を反射するための第4反射面と、前記第4反射面で反射された光を反射するための第5反射面と、前記第5反射面で反射された光を反射するための第6反射面と、前記第6反射面で反射された光を前記第2面に向けて反射するための第7反射面とを備え、前記投影光学系の入射瞳位置が、前記第1面から前記第2面への光路に沿って、前記第2反射面の第1面側の近傍よりも第2面側に設定されていることを特徴とする投影光学系を提供する。

【0009】第1発明の好ましい態様によれば、前記入射瞳位置は、前記第1面から前記第2面への光路に沿って、前記第2反射面の第1面側の近傍と前記第3反射面の第2面側の近傍との間の光路中に設定されている。

【0010】また、第1発明の好ましい態様によれば、

前記入射瞳位置が前記第1面から前記第2面への光路に沿って前記第2反射面の第1面側の近傍にあるとき、光軸と像点とを含む平面内において、光軸に対して垂直な方向にy座標を、光軸に対して像点と同じ側が正になるように設定し、前記平面内において、最大開口数の光線と前記第2反射面との交点のy座標値を y_a および y_b

$(y_a > y_b)$ とそれぞれ定義すると、

$$-1 \leq \log_e \{-(y_a/y_b)\} \leq 1$$

の条件を満足する。

【0011】さらに、第1発明の好ましい態様によれば、前記入射瞳位置は、前記第1面から前記第2面への光路に沿って、前記第2反射面上または前記第2反射面よりも第2面側に設定されている。

【0012】また、第1発明の好ましい態様によれば、前記第6反射面は、前記第4反射面と前記第5反射面との間に配置され、前記第4反射面で反射されて前記第5反射面へ向かう光線が前記第6反射面の仮想延長面を通過する位置の光軸からの距離が、前記第6反射面で反射される光線の前記第6反射面上における位置の光軸からの距離よりも小さく設定されている。また、前記第1反射面乃至前記第7反射面は、単一の光軸に沿って配置されていることが好ましい。

【0013】本発明の第2発明では、マスクを照明するための照明系と、前記マスクのパターンを感光性基板上へ投影露光するための第1発明の投影光学系とを備えていることを特徴とする露光装置を提供する。

【0014】第2発明の好ましい態様によれば、前記照明系は、露光光としてX線を供給するための光源を有し、前記投影光学系に対して前記マスクおよび前記感光性基板を相対移動させて、前記マスクのパターンを前記感光性基板上へ投影露光する。

【0015】本発明の第3発明では、第2発明の露光装置により前記マスクのパターンを前記感光性基板上に露光する露光工程と、前記露光工程により露光された前記感光性基板を現像する現像工程とを含むことを特徴とするマイクロデバイスの製造方法を提供する。

【0016】

【発明の実施の形態】本発明の典型的な態様にしたがう投影光学系は、8枚の反射ミラーから構成されている。したがって、第1面（物体面）からの光は、第1反射面、第2反射面、第3反射面、第4反射面、第5反射面、第6反射面、第7反射面、および第8反射面で順次反射された後、第2面（像面）上に第1面の像を形成する。本発明では、この基本的な構成において、光学系の入射瞳位置が、第1面から第2面への光路に沿って、第2反射面の第1面側の近傍よりも第2面側に設定されている。

【0017】具体的には、入射瞳位置は、第1面から第2面への光路に沿って、第2反射面の第1面側の近傍と第3反射面の第2面側の近傍との間の光路中に設定され

ていることが好ましい。あるいは、入射瞳位置は、第1面から第2面への光路に沿って、第2反射面上または第2反射面よりも第2面側に設定されていることが好ましい。このように、本発明の投影光学系では、その入射瞳位置が第2反射面の第1面側の近傍よりも第2面側に設定されているので、物体面と入射瞳との間で充分な収差補正を行うことができ、ひいては光学系全体の収差補正を良好に行うことができる。

【0018】ところで、本発明において、入射瞳位置が第1面から第2面への光路に沿って第2反射面の第1面側の近傍にあるとき、次の条件式(1)を満足する。換言すると、次の条件式(1)を用いて、入射瞳位置が第2反射面の第1面側の近傍にあるか否かを判定する。

$$-1 \leq \log_e \{-(y_a/y_b)\} \leq 1 \quad (1)$$

【0019】ここで、図14に示すように、光軸AXと像点IPとを含む平面内において、光軸AXに対して垂直な方向にy座標を、光軸AXに対して像点IPと同じ側が正になるように設定する。この場合、y座標の原点は、光軸AX上にある。そして、光軸AXと像点IPとを含む平面内において、最大開口数の光線41および42と第2反射面との交点AおよびBのy座標値を、 y_a および y_b ($y_a > y_b$) とそれぞれ定義する。なお、 \log_e は、自然対数を表している。

【0020】また、本発明においては、第6反射面は、第4反射面と第5反射面との間に配置され、第4反射面で反射されて第5反射面へ向かう光線が第6反射面の仮想延長面を通過する位置の光軸からの距離が、第6反射面で反射される光線の第6反射面上における位置の光軸からの距離よりも小さく設定されていることが好ましい。この構成により、第4反射面を有する反射ミラーの外径を小さくすることができ、ひいては光学系全体を径方向に小型化することができる。

【0021】また、本発明の反射型投影光学系を露光装置の投影光学系に適用することにより、露光光としてX線を使用することができる。この場合、投影光学系に対してマスクおよび感光性基板を相対移動させて、マスクのパターンを感光性基板上へ投影露光することになる。その結果、大きな解像力を有する走査型の露光装置を用いて、良好な露光条件のもとで、高精度なマイクロデバイスを製造することができる。

【0022】本発明の実施形態を、添付図面に基づいて説明する。図1は、本発明の実施形態にかかる露光装置の構成を概略的に示す図である。図1において、投影光学系の光軸方向すなわち感光性基板であるウェハの法線方向に沿ってZ軸を、ウェハ面内において図1の紙面に平行な方向にY軸を、ウェハ面内において図1の紙面に垂直な方向にX軸をそれぞれ設定している。

【0023】図1の露光装置は、露光光を供給するための光源として、たとえばレーザプラズマX線源1を備えている。X線源1から射出された光は、波長選択フィル

タ2を介して、照明光学系3に入射する。ここで、波長選択フィルタ2は、X線源1が供給する光から、所定波長(13.4nm)のX線だけを選択的に透過させ、他の波長光の透過を遮る特性を有する。

【0024】波長選択フィルタ2を透過したX線は、複数の反射ミラーから構成された照明光学系3を介して、転写すべきパターンが形成された反射型のマスク4を照明する。マスク4は、そのパターン面がXY平面に沿って延びるように、Y方向に沿って移動可能なマスクステージ5によって保持されている。そして、マスクステージ5の移動は、図示を省略したレーザ干渉計により計測されるように構成されている。こうして、マスク4上には、Y軸に関して対称な円弧状の照明領域が形成される。

【0025】照明されたマスク3のパターンからの光は、反射型の投影光学系6を介して、感光性基板であるウェハ7上にマスクパターンの像を形成する。ウェハ7は、その露光面がXY平面に沿って延びるように、X方向およびY方向に沿って二次元的に移動可能なウェハステージ8によって保持されている。なお、ウェハステージ8の移動は、マスクステージ5と同様に、図示を省略したレーザ干渉計により計測されるように構成されている。

【0026】こうして、マスクステージ5およびウェハステージ8をY方向に沿って移動させながら、すなわち投影光学系6に対してマスク4およびウェハ7をY方向に沿って相対移動させながらスキャン露光(走査露光)を行うことにより、ウェハ7の1つの露光領域にマスク4のパターンが転写される。このとき、投影光学系6の投影倍率(転写倍率)が1/4である場合、ウェハステージ8の移動速度をマスクステージ5の移動速度の1/4に設定して同期走査を行う。

【0027】また、ウェハステージ8をX方向およびY方向に沿って二次元的に移動させながら走査露光を繰り返すことにより、ウェハ7の各露光領域にマスク4のパターンが逐次転写される。以下、第1実施例～第6実施例を参照して、投影光学系6の具体的な構成について説明する。

【0028】各実施例において、投影光学系6は、8つの反射ミラーCM1～CM8を備えている。すなわち、マスク4からの光は、第1反射ミラーCM1の反射面R1、第2反射ミラーCM2の反射面R2、第3反射ミラーCM3の反射面R3、第4反射ミラーCM4の反射面R4、第5反射ミラーCM5の反射面R5、第6反射ミラーCM6の反射面R1、第7反射ミラーCM7の反射面R7、および第8反射ミラーCM8の反射面R8で順次反射された後、ウェハ7上にマスクパターン像を形成する。なお、各実施例において、すべての反射面R1～R8が非球面状に形成されている。また、各実施例において、光学系の入射瞳が第2反射面R2上あるいは第2

反射面よりもウェハ側に位置するように構成されている。

【0029】各実施例において、非球面は、光軸に垂直な方向の高さを y とし、非球面の頂点における接平面から高さ y における非球面上の位置までの光軸に沿った距

離（サグ量）を z とし、頂点曲率半径を r とし、円錐係数を κ とし、 n 次の非球面係数を C_n としたとき、以下の数式（b）で表される。

【数1】

$$z = (y^2/r) / [1 + \{1 - (1 + \kappa) \cdot y^2/r^2\}^{1/2}] + C_4 \cdot y^4 + C_6 \cdot y^6 + C_8 \cdot y^8 + C_{10} \cdot y^{10} \quad (b)$$

【0030】【第1実施例】図2は、本実施形態の第1実施例にかかる投影光学系の構成を示す図である。図2を参照すると、第1実施例の投影光学系では、マスク4 10からの光が、第1反射ミラーCM1の凹面状の反射面R1、第2反射ミラーCM2の凸面状の反射面R2、第3反射ミラーCM3の凸面状の反射面R3、第4反射ミラーCM4の凹面状の反射面R4、第5反射ミラーCM5の凹面状の反射面R5、第6反射ミラーCM6の凹面状の反射面R6、第7反射ミラーCM7の凸面状の反射面R7、および第8反射ミラーCM8の凹面状の反射面R8を介して、ウェハ7上にマスクパターンの縮小像を形成する。第1実施例では、光学系の入射瞳が第3反射面R3上に位置するように構成されている。

【0031】次の表（1）に、第1実施例の投影光学系の諸元の値を掲げる。表（1）において、 λ は露光光の波長を、 β は投影倍率（転写倍率）をそれぞれ表している。また、面番号は物体面であるマスク面から像面であるウェハ面への光線の進行する方向に沿ったマスク側からの反射面の順序を、 r は各反射面の頂点曲率半径（mm）を、 d は各反射面の軸上間隔すなわち面間隔（mm）をそれぞれ示している。なお、面間隔 d は、反射される度にその符号を変えるものとする。そして、光線の入射方向にかかわらずマスク側に向かって凸面の曲率半径を正とし、凹面の曲率半径を負としている。

【0032】

20 【表1】

（主要諸元）

$\lambda = 13.4 \text{ nm}$

$\beta = 1/4$

（光学部材諸元）

面番号	r	d	
	（マスク面）	362.513162	
1	-302.93934	-90.018587	（第1反射面R1）
2	-370.67510	45.295314	（第2反射面R2）
3	598.77300	-158.501234	（第3反射面R3）
4	472.05608	765.865368	（第4反射面R4）
5	-2045.09307	-321.519505	（第5反射面R5）
6	1225.38595	482.551711	（第6反射面R6）
7	202.62044	-313.137886	（第7反射面R7）
8	371.36809	333.137886	（第8反射面R8）

（ウェハ面）

（非球面データ）

1面

$\kappa = 0.000000$

$C_4 = +0.233951 \times 10^{-8}$

$C_6 = +0.497703 \times 10^{-13}$

$C_8 = +0.851811 \times 10^{-18}$

$C_{10} = +0.760736 \times 10^{-23}$

2面

$\kappa = 0.000000$

$C_4 = +0.600389 \times 10^{-7}$

$C_6 = -0.557800 \times 10^{-11}$

$C_8 = +0.176763 \times 10^{-15}$

$C_{10} = +0.415572 \times 10^{-20}$

3面

$$\kappa = 0.000000$$

$$C_4 = -0.362683 \times 10^{-7}$$

$$C_6 = -0.592352 \times 10^{-12}$$

$$C_8 = +0.766738 \times 10^{-14}$$

$$C_{10} = -0.429557 \times 10^{-17}$$

4面

$$\kappa = 0.000000$$

$$C_4 = -0.345494 \times 10^{-9}$$

$$C_6 = +0.332528 \times 10^{-14}$$

$$C_8 = -0.585963 \times 10^{-21}$$

$$C_{10} = -0.888898 \times 10^{-24}$$

5面

$$\kappa = 0.000000$$

$$C_4 = +0.204498 \times 10^{-9}$$

$$C_6 = +0.782755 \times 10^{-14}$$

$$C_8 = -0.446431 \times 10^{-19}$$

$$C_{10} = +0.198671 \times 10^{-24}$$

6面

$$\kappa = 0.000000$$

$$C_4 = +0.362063 \times 10^{-9}$$

$$C_6 = +0.308956 \times 10^{-14}$$

$$C_8 = -0.124229 \times 10^{-19}$$

$$C_{10} = +0.515926 \times 10^{-25}$$

7面

$$\kappa = 0.000000$$

$$C_4 = +0.586897 \times 10^{-7}$$

$$C_6 = +0.278165 \times 10^{-11}$$

$$C_8 = +0.184001 \times 10^{-15}$$

$$C_{10} = +0.990070 \times 10^{-20}$$

8面

$$\kappa = 0.000000$$

$$C_4 = +0.180870 \times 10^{-9}$$

$$C_6 = +0.157395 \times 10^{-14}$$

$$C_8 = +0.124208 \times 10^{-19}$$

$$C_{10} = +0.207770 \times 10^{-24}$$

【0033】図3は、第1実施例の投影光学系におけるコマ収差を示す図である。図3では、像高100%、像高97%、および像高94%におけるメリディオナルコマ収差およびサジタルコマ収差を示している。収差図から明らかなように、第1実施例では、コマ収差が良好に補正されていることがわかる。また、図示を省略したが、コマ収差以外の他の諸収差も良好に補正されていることが確認されている。

【0034】〔第2実施例〕図4は、本実施形態の第2

実施例にかかる投影光学系の構成を示す図である。図4を参照すると、第2実施例の投影光学系では、マスク4からの光が、第1反射ミラーCM1の凹面状の反射面R1、第2反射ミラーCM2の凹面状の反射面R2、第3反射ミラーCM3の凸面状の反射面R3、第4反射ミラーCM4の凹面状の反射面R4、第5反射ミラーCM5の凹面状の反射面R5、第6反射ミラーCM6の凸面状の反射面R1、第7反射ミラーCM7の凸面状の反射面R7、および第8反射ミラーCM8の凹面状の反射面R

8を介して、ウェハ7上にマスクパターンの縮小像を形成する。第2実施例では、光学系の入射瞳が第2反射面R2上に位置するように構成されている。なお、図4では、各反射ミラーCM1～CM8の図示を省略している。

【0035】次の表(2)に、第2実施例の投影光学系の諸元の値を掲げる。表(2)において、 λ は露光光の波長を、 β は投影倍率(転写倍率)をそれぞれ表している。また、面番号は物体面であるマスク面から像面であ

るウェハ面への光線の進行する方向に沿ったマスク側からの反射面の順序を、 r は各反射面の頂点曲率半径(mm)を、 d は各反射面の軸上間隔すなわち面間隔(mm)をそれぞれ示している。なお、面間隔 d は、反射される度にその符号を変えるものとする。そして、光線の入射方向にかかわらずマスク側に向かって凸面の曲率半径を正とし、凹面の曲率半径を負としている。

【0036】

【表2】

(主要諸元)

$$\lambda = 13.4 \text{ nm}$$

$$\beta = 1/4$$

(光学部材諸元)

面番号	r	d	
	(マスク面)	414.867263	
1	-981.67890	-259.284927	(第1反射面R1)
2	1337.58951	143.049955	(第2反射面R2)
3	316.43313	-248.632300	(第3反射面R3)
4	637.54556	665.713542	(第4反射面R4)
5	-474.03429	-104.854022	(第5反射面R5)
6	-483.71464	213.536974	(第6反射面R6)
7	300.89234	-268.605883	(第7反射面R7)
8	324.67446	306.527906	(第8反射面R8)

(ウェハ面)

(非球面データ)

1面

$$\kappa = 0.000000$$

$$C_4 = -0.138759 \times 10^{-8}$$

$$C_6 = +0.210310 \times 10^{-13}$$

$$C_8 = -0.141560 \times 10^{-18}$$

$$C_{10} = -0.219913 \times 10^{-24}$$

2面

$$\kappa = 0.000000$$

$$C_4 = +0.166932 \times 10^{-7}$$

$$C_6 = +0.141755 \times 10^{-11}$$

$$C_8 = +0.971265 \times 10^{-16}$$

$$C_{10} = +0.995857 \times 10^{-20}$$

3面

$$\kappa = 0.000000$$

$$C_4 = -0.891216 \times 10^{-8}$$

$$C_6 = +0.658862 \times 10^{-12}$$

$$C_8 = -0.491378 \times 10^{-17}$$

$$C_{10} = +0.628038 \times 10^{-21}$$

4面

$$\kappa = 0.000000$$

$$C_4 = -0.237356 \times 10^{-9}$$

$$C_6 = +0.521596 \times 10^{-15}$$

$$C_8 = +0.663314 \times 10^{-20}$$

$$C_{10} = -0.532651 \times 10^{-26}$$

5面

$$\kappa = 0.000000$$

$$C_4 = +0.183804 \times 10^{-8}$$

$$C_6 = +0.188427 \times 10^{-14}$$

$$C_8 = +0.140439 \times 10^{-18}$$

$$C_{10} = -0.882067 \times 10^{-25}$$

6面

$$\kappa = 0.000000$$

$$C_4 = +0.155806 \times 10^{-7}$$

$$C_6 = -0.492169 \times 10^{-12}$$

$$C_8 = +0.242400 \times 10^{-16}$$

$$C_{10} = -0.500124 \times 10^{-21}$$

7面

$$\kappa = 0.000000$$

$$C_4 = +0.995873 \times 10^{-7}$$

$$C_6 = +0.261379 \times 10^{-11}$$

$$C_8 = +0.253566 \times 10^{-15}$$

$$C_{10} = +0.807092 \times 10^{-19}$$

8面

$$\kappa = 0.000000$$

$$C_4 = -0.626798 \times 10^{-10}$$

$$C_6 = -0.536929 \times 10^{-15}$$

$$C_8 = -0.131253 \times 10^{-19}$$

$$C_{10} = -0.474237 \times 10^{-24}$$

【0037】図5は、第2実施例の投影光学系におけるコマ収差を示す図である。図5では、像高100%、像高97%、および像高94%におけるメリディオナルコマ収差およびサジタルコマ収差を示している。収差図から明らかなように、第2実施例においても第1実施例と同様に、コマ収差が良好に補正されていることがわかる。また、図示を省略したが、コマ収差以外の他の諸収差も良好に補正されていることが確認されている。

【0038】〔第3実施例〕図6は、本実施形態の第3実施例にかかる投影光学系の構成を示す図である。図6を参照すると、第3実施例の投影光学系では、マスク4からの光が、第1反射ミラーCM1の凹面状の反射面R1、第2反射ミラーCM2の凹面状の反射面R2、第3反射ミラーCM3の凸面状の反射面R3、第4反射ミラーCM4の凹面状の反射面R4、第5反射ミラーCM5の凸面状の反射面R5、第6反射ミラーCM6の凹面状の反射面R6、第7反射ミラーCM7の凸面状の反射面R7、および第8反射ミラーCM8の凹面状の反射面R

(主要諸元)

$$\lambda = 13.4 \text{ nm}$$

8を介して、ウェハ7上にマスクパターンの縮小像を形成する。第3実施例では、光学系の入射瞳が第3反射面R3上に位置するように構成されている。なお、図6では、各反射ミラーCM1～CM8の図示を省略している。

【0039】次の表(3)に、第3実施例の投影光学系の諸元の値を掲げる。表(3)において、 λ は露光光の波長を、 β は投影倍率(転写倍率)をそれぞれ表している。また、面番号は物体面であるマスク面から像面であるウェハ面への光線の進行する方向に沿ったマスク側からの反射面の順序を、 r は各反射面の頂点曲率半径(mm)を、 d は各反射面の軸上間隔すなわち面間隔(mm)をそれぞれ示している。なお、面間隔 d は、反射される度にその符号を変えるものとする。そして、光線の入射方向にかかわらずマスク側に向かって凸面の曲率半径を正とし、凹面の曲率半径を負としている。

【0040】

【表3】

$$\beta = 1/4$$

(光学部材諸元)

面番号	r	d	
	(マスク面)	318.549506	
1	-2404.79993	-205.222555	(第1反射面R1)
2	763.64299	143.883971	(第2反射面R2)
3	284.85995	-207.210933	(第3反射面R3)
4	562.05981	611.273283	(第4反射面R4)
5	1712.84079	-213.065615	(第5反射面R5)
6	544.56386	363.442359	(第6反射面R6)
7	232.24531	-283.351415	(第7反射面R7)
8	327.20625	306.745621	(第8反射面R8)
	(ウェハ面)		

(非球面データ)

1面

$$\kappa = 0.000000$$

$$C_4 = -0.545411 \times 10^{-8}$$

$$C_6 = +0.223041 \times 10^{-13}$$

$$C_8 = +0.162396 \times 10^{-18}$$

$$C_{10} = -0.564415 \times 10^{-23}$$

2面

$$\kappa = 0.000000$$

$$C_4 = -0.825111 \times 10^{-8}$$

$$C_6 = -0.455352 \times 10^{-13}$$

$$C_8 = +0.136019 \times 10^{-18}$$

$$C_{10} = -0.629949 \times 10^{-22}$$

3面

$$\kappa = 0.000000$$

$$C_4 = -0.301775 \times 10^{-7}$$

$$C_6 = +0.754443 \times 10^{-13}$$

$$C_8 = +0.539533 \times 10^{-16}$$

$$C_{10} = -0.147806 \times 10^{-19}$$

4面

$$\kappa = 0.000000$$

$$C_4 = -0.681896 \times 10^{-9}$$

$$C_6 = -0.328856 \times 10^{-14}$$

$$C_8 = -0.252789 \times 10^{-19}$$

$$C_{10} = -0.428046 \times 10^{-25}$$

5面

$$\kappa = 0.000000$$

$$C_4 = +0.981718 \times 10^{-9}$$

$$C_6 = -0.600138 \times 10^{-14}$$

$$C_8 = -0.829770 \times 10^{-19}$$

$$C_{10} = +0.130869 \times 10^{-23}$$

6面

$\kappa = 0.000000$
 $C_4 = +0.463677 \times 10^{-9}$
 $C_6 = +0.117597 \times 10^{-15}$
 $C_8 = -0.160435 \times 10^{-19}$
 $C_{10} = +0.289024 \times 10^{-24}$

7面

$\kappa = 0.000000$
 $C_4 = +0.872492 \times 10^{-7}$
 $C_6 = +0.783801 \times 10^{-11}$
 $C_8 = +0.939959 \times 10^{-16}$
 $C_{10} = +0.650230 \times 10^{-19}$

8面

$\kappa = 0.000000$
 $C_4 = +0.161940 \times 10^{-9}$
 $C_6 = +0.200482 \times 10^{-14}$
 $C_8 = +0.230772 \times 10^{-19}$
 $C_{10} = +0.192764 \times 10^{-24}$

【0041】図7は、第3実施例の投影光学系におけるコマ収差を示す図である。図7では、像高100%、像高97%、および像高94%におけるメリディオナルコマ収差およびサジタルコマ収差を示している。収差図から明らかなように、第3実施例においても第1実施例および第2実施例と同様に、コマ収差が良好に補正されていることがわかる。また、図示を省略したが、コマ収差以外の他の諸収差も良好に補正されていることが確認されている。

【0042】〔第4実施例〕図8は、本実施形態の第4実施例にかかる投影光学系の構成を示す図である。図8を参照すると、第4実施例の投影光学系では、マスク4からの光が、第1反射ミラーCM1の凸面状の反射面R1、第2反射ミラーCM2の凹面状の反射面R2、第3反射ミラーCM3の凸面状の反射面R3、第4反射ミラーCM4の凹面状の反射面R4、第5反射ミラーCM5の凹面状の反射面R5、第6反射ミラーCM6の凹面状の反射面R6、第7反射ミラーCM7の凸面状の反射面R7、および第8反射ミラーCM8の凹面状の反射面R

(主要諸元)

$\lambda = 13.4 \text{ nm}$

$\beta = 1/4$

(光学部材諸元)

面番号	r	d	
	(マスク面)	355.178664	
1	7000.00000	-184.529990	(第1反射面R1)
2	357.50053	105.786452	(第2反射面R2)
3	171.42264	-140.765892	(第3反射面R3)
4	429.87840	513.880742	(第4反射面R4)
5	-7000.00000	-241.299921	(第5反射面R5)
6	591.25546	309.115334	(第6反射面R6)

8を介して、ウェハ7上にマスクパターンの縮小像を形成する。第4実施例では、光学系の入射瞳が第3反射面R3上に位置するように構成されている。なお、図8では、各反射ミラーCM1～CM8の図示を省略している。

【0043】次の表(4)に、第4実施例の投影光学系の諸元の値を掲げる。表(4)において、 λ は露光光の波長を、 β は投影倍率(転写倍率)をそれぞれ表している。また、面番号は物体面であるマスク面から像面であるウェハ面への光線の進行する方向に沿ったマスク側からの反射面の順序を、rは各反射面の頂点曲率半径(mm)を、dは各反射面の軸上間隔すなわち面間隔(mm)をそれぞれ示している。なお、面間隔dは、反射される度にその符号を変えるものとする。そして、光線の入射方向にかかわらずマスク側に向かって凸面の曲率半径を正とし、凹面の曲率半径を負としている。

【0044】

【表4】

7 235.55238 -254.220109 (第7反射面R7)
 8 305.96266 274.220109 (第8反射面R8)

(ウェハ面)

(非球面データ)

1面

$\kappa = 0.000000$

$C_4 = -0.598452 \times 10^{-8}$

$C_6 = -0.137754 \times 10^{-13}$

$C_8 = +0.476250 \times 10^{-18}$

$C_{10} = -0.133648 \times 10^{-22}$

2面

$\kappa = 0.000000$

$C_4 = -0.690445 \times 10^{-8}$

$C_6 = -0.289971 \times 10^{-13}$

$C_8 = -0.115360 \times 10^{-16}$

$C_{10} = -0.151551 \times 10^{-21}$

3面

$\kappa = 0.000000$

$C_4 = -0.473187 \times 10^{-7}$

$C_6 = +0.339852 \times 10^{-12}$

$C_8 = +0.157642 \times 10^{-15}$

$C_{10} = +0.843742 \times 10^{-19}$

4面

$\kappa = 0.000000$

$C_4 = -0.234100 \times 10^{-8}$

$C_6 = -0.168929 \times 10^{-13}$

$C_8 = -0.218648 \times 10^{-18}$

$C_{10} = -0.596612 \times 10^{-23}$

5面

$\kappa = 0.000000$

$C_4 = +0.932160 \times 10^{-9}$

$C_6 = -0.344879 \times 10^{-13}$

$C_8 = +0.887819 \times 10^{-18}$

$C_{10} = -0.130370 \times 10^{-22}$

6面

$\kappa = 0.000000$

$C_4 = +0.141487 \times 10^{-8}$

$C_6 = -0.754384 \times 10^{-13}$

$C_8 = +0.181519 \times 10^{-17}$

$C_{10} = -0.188727 \times 10^{-22}$

7面

$\kappa = 0.000000$

$C_4 = +0.497794 \times 10^{-7}$

$C_6 = +0.797436 \times 10^{-11}$

$$C_8 = -0.213306 \times 10^{-14}$$

$$C_{10} = +0.154617 \times 10^{-18}$$

8面

$$\kappa = 0.000000$$

$$C_4 = +0.455892 \times 10^{-9}$$

$$C_6 = +0.623196 \times 10^{-14}$$

$$C_8 = +0.824642 \times 10^{-19}$$

$$C_{10} = +0.134139 \times 10^{-23}$$

【0045】図9は、第4実施例の投影光学系におけるコマ収差を示す図である。図9では、像高100%、像高97%、および像高94%におけるメリディオナルコマ収差およびサジタルコマ収差を示している。収差図から明らかなように、第4実施例においても第1実施例～第3実施例と同様に、コマ収差が良好に補正されていることがわかる。また、図示を省略したが、コマ収差以外の他の諸収差も良好に補正されていることが確認されている。

【0046】【第5実施例】図10は、本実施形態の第5実施例にかかる投影光学系の構成を示す図である。図10を参照すると、第5実施例の投影光学系では、マスク4からの光が、第1反射ミラーCM1の凹面状の反射面R1、第2反射ミラーCM2の凸面状の反射面R2、第3反射ミラーCM3の凹面状の反射面R3、第4反射ミラーCM4の凹面状の反射面R4、第5反射ミラーCM5の凹面状の反射面R5、第6反射ミラーCM6の凹面状の反射面R1、第7反射ミラーCM7の凸面状の反射面R7、および第8反射ミラーCM8の凹面状の反射

面R8を介して、ウェハ7上にマスクパターンの縮小像を形成する。第5実施例では、光学系の入射瞳が第3反射面R3上に位置するように構成されている。なお、図10では、各反射ミラーCM1～CM8の図示を省略している。

【0047】次の表(5)に、第5実施例の投影光学系の諸元の値を掲げる。表(5)において、 λ は露光光の波長を、 β は投影倍率(転写倍率)をそれぞれ表している。また、面番号は物体面であるマスク面から像面であるウェハ面への光線の進行する方向に沿ったマスク側からの反射面の順序を、 r は各反射面の頂点曲率半径(mm)を、 d は各反射面の軸上間隔すなわち面間隔(mm)をそれぞれ示している。なお、面間隔 d は、反射される度にその符号を変えるものとする。そして、光線の入射方向にかかわらずマスク側に向かって凸面の曲率半径を正とし、凹面の曲率半径を負としている。

【0048】

【表5】

(主要諸元)

$$\lambda = 13.4 \text{ nm}$$

$$\beta = 1/4$$

(光学部材諸元)

面番号	r	d	
	(マスク面)	398.983276	
1	-317.52637	-94.239390	(第1反射面R1)
2	-296.06855	44.928035	(第2反射面R2)
3	-5000.00000	-294.204004	(第3反射面R3)
4	751.85563	906.398723	(第4反射面R4)
5	-5988.20667	-462.129326	(第5反射面R5)
6	1264.06144	609.604166	(第6反射面R6)
7	213.09621	-334.049468	(第7反射面R7)
8	397.27735	354.049468	(第8反射面R8)

(ウェハ面)

(非球面データ)

1面

$$\kappa = 0.000000$$

$$C_4 = +0.238899 \times 10^{-8}$$

$$C_6 = +0.530727 \times 10^{-13}$$

$$C_8 = +0.102960 \times 10^{-17}$$

$$C_{10} = +0.341571 \times 10^{-23}$$

2面

$$\kappa = 0.000000$$

$$C_4 = +0.704634 \times 10^{-7}$$

$$C_6 = -0.615324 \times 10^{-11}$$

$$C_8 = +0.936665 \times 10^{-16}$$

$$C_{10} = +0.326427 \times 10^{-19}$$

3面

$$\kappa = 0.000000$$

$$C_4 = -0.155874 \times 10^{-7}$$

$$C_6 = +0.323391 \times 10^{-12}$$

$$C_8 = +0.343680 \times 10^{-14}$$

$$C_{10} = -0.103463 \times 10^{-17}$$

4面

$$\kappa = 0.000000$$

$$C_4 = +0.210169 \times 10^{-10}$$

$$C_6 = -0.134478 \times 10^{-15}$$

$$C_8 = +0.251514 \times 10^{-19}$$

$$C_{10} = -0.303783 \times 10^{-24}$$

5面

$$\kappa = 0.000000$$

$$C_4 = +0.233635 \times 10^{-9}$$

$$C_6 = +0.316884 \times 10^{-14}$$

$$C_8 = -0.129819 \times 10^{-19}$$

$$C_{10} = +0.518992 \times 10^{-25}$$

6面

$$\kappa = 0.000000$$

$$C_4 = +0.164370 \times 10^{-9}$$

$$C_6 = +0.767827 \times 10^{-15}$$

$$C_8 = -0.146283 \times 10^{-20}$$

$$C_{10} = +0.416910 \times 10^{-26}$$

7面

$$\kappa = 0.000000$$

$$C_4 = +0.479273 \times 10^{-7}$$

$$C_6 = +0.170344 \times 10^{-11}$$

$$C_8 = +0.950581 \times 10^{-16}$$

$$C_{10} = +0.138644 \times 10^{-20}$$

8面

$$\kappa = 0.000000$$

$$C_4 = +0.150982 \times 10^{-9}$$

$$C_6 = +0.118318 \times 10^{-14}$$

$$C_8 = +0.854121 \times 10^{-20}$$

$$C_{10} = +0.129800 \times 10^{-24}$$

【0049】図11は、第5実施例の投影光学系におけるコマ収差を示す図である。図11では、像高100

%、像高97%、および像高94%におけるメリディオナルコマ収差およびサジタルコマ収差を示している。収差図から明らかなように、第5実施例においても第1実施例～第4実施例と同様に、コマ収差が良好に補正されていることがわかる。また、図示を省略したが、コマ収差以外の他の諸収差も良好に補正されていることが確認されている。

【0050】【第6実施例】図12は、本実施形態の第6実施例にかかる投影光学系の構成を示す図である。図12を参照すると、第6実施例の投影光学系では、マスク4からの光が、第1反射ミラーCM1の凸面状の反射面R1、第2反射ミラーCM2の凹面状の反射面R2、第3反射ミラーCM3の凸面状の反射面R3、第4反射ミラーCM4の凹面状の反射面R4、第5反射ミラーCM5の凹面状の反射面R5、第6反射ミラーCM6の凸面状の反射面R1、第7反射ミラーCM7の凸面状の反射面R7、および第8反射ミラーCM8の凹面状の反射面R8を介して、ウェハ7上にマスクパターンの縮小像

を形成する。第6実施例では、光学系の入射瞳が第2反射面R2上に位置するように構成されている。なお、図12では、各反射ミラーCM1～CM8の図示を省略している。

【0051】次の表(6)に、第6実施例の投影光学系の諸元の値を掲げる。表(6)において、 λ は露光光の波長を、 β は投影倍率(転写倍率)をそれぞれ表している。また、面番号は物体面であるマスク面から像面であるウェハ面への光線の進行する方向に沿ったマスク側からの反射面の順序を、 r は各反射面の頂点曲率半径(mm)を、 d は各反射面の軸上間隔すなわち面間隔(mm)をそれぞれ示している。なお、面間隔 d は、反射される度にその符号を変えるものとする。そして、光線の入射方向にかかわらずマスク側に向かって凸面の曲率半径を正とし、凹面の曲率半径を負としている。

【0052】

【表6】

(主要諸元)

$\lambda = 13.4 \text{ nm}$

$\beta = 1/4$

(光学部材諸元)

面番号	r	d	
	(マスク面)	619.919792	
1	2853.63937	-503.669649	(第1反射面R1)
2	971.62862	538.579512	(第2反射面R2)
3	1180.36783	-604.829661	(第3反射面R3)
4	1742.42693	952.024453	(第4反射面R4)
5	-409.39322	-97.171877	(第5反射面R5)
6	-334.54066	226.989209	(第6反射面R6)
7	375.95002	-284.488510	(第7反射面R7)
8	355.86799	306.647445	(第8反射面R8)
	(ウェハ面)		

(非球面データ)

1面

$K = 0.000000$

$C_4 = -0.513849 \times 10^{-9}$

$C_6 = +0.154394 \times 10^{-13}$

$C_8 = -0.531516 \times 10^{-19}$

$C_{10} = +0.374663 \times 10^{-24}$

2面

$K = 0.000000$

$C_4 = -0.190894 \times 10^{-9}$

$C_6 = -0.227357 \times 10^{-14}$

$C_8 = -0.247734 \times 10^{-19}$

$C_{10} = -0.199472 \times 10^{-24}$

3面

$K = 0.000000$

$$\begin{aligned}C_4 &= -0.499244 \times 10^{-9} \\C_6 &= -0.789053 \times 10^{-15} \\C_8 &= -0.480158 \times 10^{-19} \\C_{10} &= -0.302052 \times 10^{-24}\end{aligned}$$

4面

$$\begin{aligned}\kappa &= 0.000000 \\C_4 &= -0.276252 \times 10^{-9} \\C_6 &= -0.737257 \times 10^{-15} \\C_8 &= -0.195497 \times 10^{-20} \\C_{10} &= -0.254863 \times 10^{-25}\end{aligned}$$

5面

$$\begin{aligned}\kappa &= 0.000000 \\C_4 &= +0.778078 \times 10^{-9} \\C_6 &= +0.484140 \times 10^{-14} \\C_8 &= -0.845350 \times 10^{-20} \\C_{10} &= +0.284273 \times 10^{-24}\end{aligned}$$

6面

$$\begin{aligned}\kappa &= 0.000000 \\C_4 &= +0.485099 \times 10^{-8} \\C_6 &= +0.187224 \times 10^{-13} \\C_8 &= -0.425640 \times 10^{-18} \\C_{10} &= +0.134780 \times 10^{-22}\end{aligned}$$

7面

$$\begin{aligned}\kappa &= 0.000000 \\C_4 &= +0.193592 \times 10^{-7} \\C_6 &= +0.173237 \times 10^{-13} \\C_8 &= -0.116130 \times 10^{-16} \\C_{10} &= -0.324515 \times 10^{-20}\end{aligned}$$

8面

$$\begin{aligned}\kappa &= 0.000000 \\C_4 &= +0.462096 \times 10^{-9} \\C_6 &= +0.596479 \times 10^{-14} \\C_8 &= +0.618751 \times 10^{-19} \\C_{10} &= +0.127103 \times 10^{-23}\end{aligned}$$

【0053】図13は、第6実施例の投影光学系におけるコマ収差を示す図である。図13では、像高100%、像高97%、および像高94%におけるメリディオナルコマ収差およびサジタルコマ収差を示している。収差図から明らかなように、第6実施例においても第1実施例～第5実施例と同様に、コマ収差が良好に補正されていることがわかる。また、図示を省略したが、コマ収差以外の他の諸収差も良好に補正されていることが確認されている。

【0054】なお、図4に示すように、ウェハ7上での有効露光視野およびマスク4上での有効照明視野を規定

するための視野絞りSを、投影光学系6の光路中においてウェハ7の露光面およびマスク4のパターン面と光学的に共役な位置に設けることができる。この場合、照明光学系3の光路中に同様の視野絞りを配置するとともに投影光学系6の光路中に視野絞りSを配置してもよいし、照明光学系3の光路中に視野絞りを配置することなく投影光学系6の光路中だけに視野絞りSを配置してもよい。

【0055】また、図4を参照すると、第2実施例の投影光学系6では、第4反射面R4で反射されて第5反射面R5へ向かう光線が第6反射面R6の仮想延長面（第

6反射面を延長して得られる仮想面)を通過する位置の光軸からの距離が、第6反射面R6で反射される光線の第6反射面R6上における位置の光軸からの距離よりも大きく設定されている。その結果、第4反射面R4を有する第4反射ミラーCM4(図4では不図示)の外径が大型化し、ひいては光学系全体が径方向に大型化していることがわかる。

【0056】換言すると、第2実施例以外の他の実施例にかかる投影光学系6では、第4反射面R4で反射されて第5反射面R5へ向かう光線が第6反射面R6の仮想延長面を通過する位置の光軸からの距離が、第6反射面R6で反射される光線の第6反射面R6上における位置の光軸からの距離よりも小さく設定されている。その結果、第4反射面R4を有する第4反射ミラーCM4の外径の小型化が、ひいては光学系全体の径方向の小型化が図られている。

【0057】上述の実施形態にかかる露光装置では、照明系によってマスクを照明し(照明工程)、投影光学系を用いてマスクに形成された転写用のパターンを感光性基板上に露光する(露光工程)ことにより、マイクロデバイス(半導体素子、撮像素子、液晶表示素子、薄膜磁気ヘッド等)を製造することができる。以下、本実施形態の露光装置を用いて感光性基板としてのウェハ等に所定の回路パターンを形成することによって、マイクロデバイスとしての半導体デバイスを得る際の手法の一例につき図15のフローチャートを参照して説明する。

【0058】まず、図15のステップ301において、1ロットのウェハ上に金属膜が蒸着される。次のステップ302において、その1ロットのウェハ上の金属膜上にフォトリソが塗布される。その後、ステップ303において、本実施形態の露光装置を用いて、マスク(レチクル)上のパターンの像がその投影光学系を介して、その1ロットのウェハ上の各ショット領域に順次露光転写される。

【0059】その後、ステップ304において、その1ロットのウェハ上のフォトリソの現像が行われた後、ステップ305において、その1ロットのウェハ上でレジストパターンをマスクとしてエッチングを行うことによって、マスク上のパターンに対応する回路パターンが、各ウェハ上の各ショット領域に形成される。その後、更に上のレイヤの回路パターンの形成等を行うことによって、半導体素子等のデバイスが製造される。上述の半導体デバイス製造方法によれば、極めて微細な回路パターンを有する半導体デバイスをスループット良く得ることができる。

【0060】なお、上述の本実施形態では、X線を供給するための光源としてレーザプラズマX線源を用いているが、これに限定されことなく、X線としてたとえばシンクロトロン放射(SOR)光を用いることもできる。

【0061】また、上述の本実施形態では、X線を供給するための光源を有する露光装置に本発明を適用しているが、これに限定されことなく、X線以外の他の波長光を供給する光源を有する露光装置に対しても本発明を適用することができる。

【0062】さらに、上述の本実施形態では、露光装置の投影光学系に本発明を適用しているが、これに限定されことなく、他の一般的な投影光学系に対しても本発明を適用することができる。

【0063】

【発明の効果】以上説明したように、本発明の投影光学系では、その入射瞳位置が第2反射面の第1面側の近傍よりも第2面側に設定されているので、物体面と入射瞳との間で十分な収差補正を行うことができ、ひいては光学系全体の収差補正を良好に行うことができる。

【0064】また、本発明の反射型投影光学系を露光装置の投影光学系に適用することにより、露光光としてX線を使用することができる。この場合、投影光学系に対してマスクおよび感光性基板を相対移動させて、マスクのパターンを感光性基板上へ投影露光することになる。その結果、大きな解像力を有する走査型の露光装置を用いて、良好な露光条件のもとで、高精度なマイクロデバイスを製造することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の実施形態にかかる露光装置の構成を概略的に示す図である。

【図2】本実施形態の第1実施例にかかる投影光学系の構成を示す図である。

【図3】第1実施例の投影光学系におけるコマ収差を示す図である。

【図4】本実施形態の第2実施例にかかる投影光学系の構成を示す図である。

【図5】第2実施例の投影光学系におけるコマ収差を示す図である。

【図6】本実施形態の第3実施例にかかる投影光学系の構成を示す図である。

【図7】第3実施例の投影光学系におけるコマ収差を示す図である。

【図8】本実施形態の第4実施例にかかる投影光学系の構成を示す図である。

【図9】第4実施例の投影光学系におけるコマ収差を示す図である。

【図10】本実施形態の第5実施例にかかる投影光学系の構成を示す図である。

【図11】第5実施例の投影光学系におけるコマ収差を示す図である。

【図12】本実施形態の第6実施例にかかる投影光学系の構成を示す図である。

【図13】第6実施例の投影光学系におけるコマ収差を示す図である。

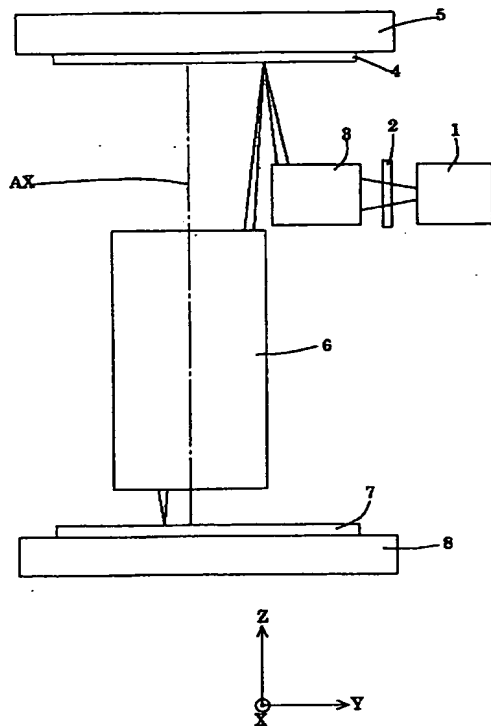
【図14】本発明の条件式(1)を説明するための図である。

【図15】マイクロデバイスとしての半導体デバイスを得る際の手法の一例について、そのフローチャートを示す図である。

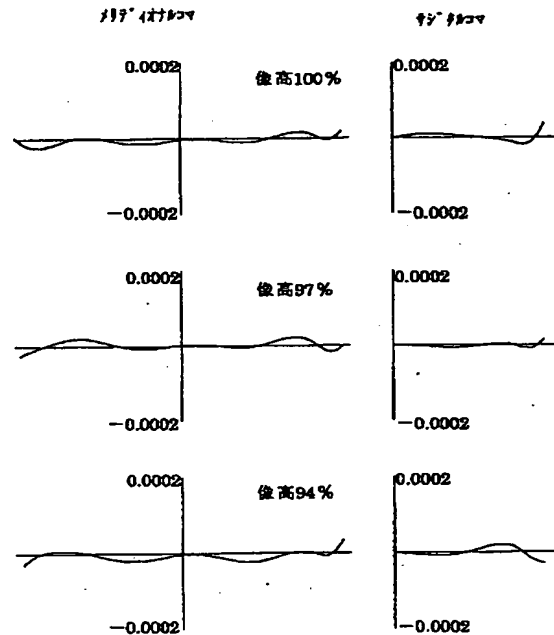
【符号の説明】

- | | |
|--------------|---------------|
| 1 レーザプラズマX線源 | 4 マスク |
| 2 波長選択フィルター | 5 マスクステージ |
| 3 照明光学系 | 6 投影光学系 |
| | 7 ウェハ |
| | 8 ウェハステージ |
| | CM1~CM8 反射ミラー |
| | R1~R8 反射面 |
| | S 視野絞り |

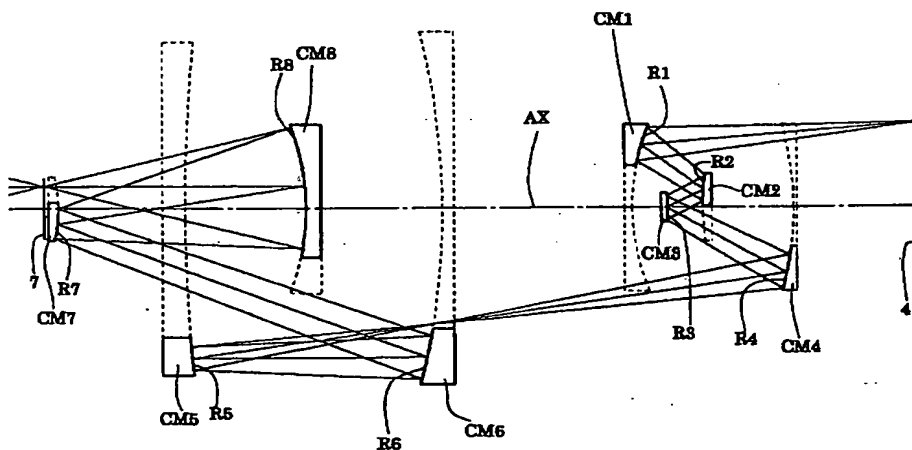
【図1】



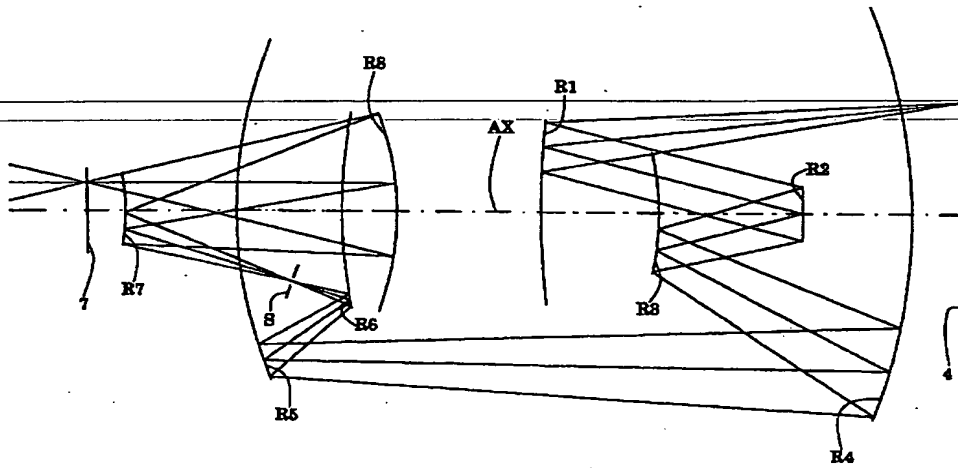
【図3】



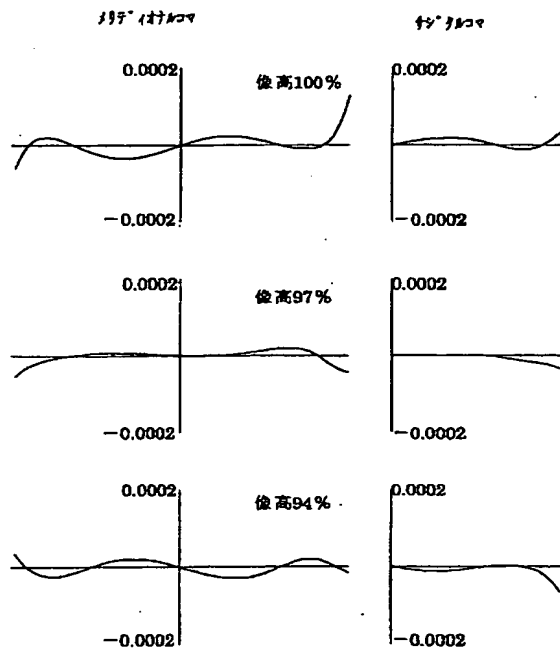
【図2】



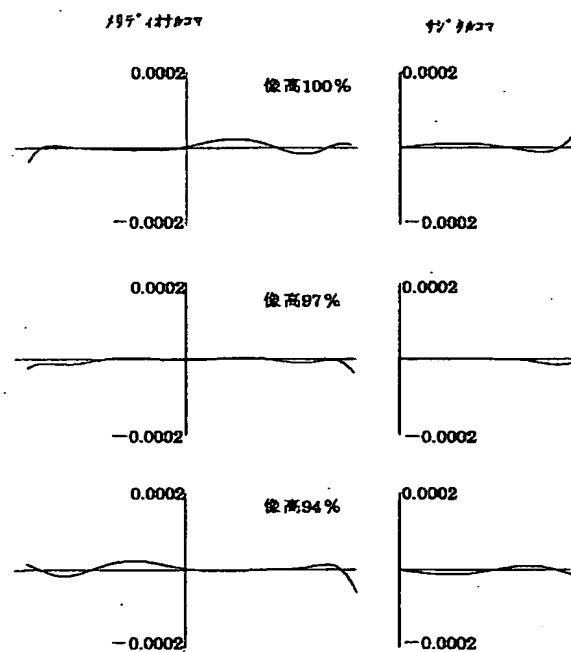
【図4】



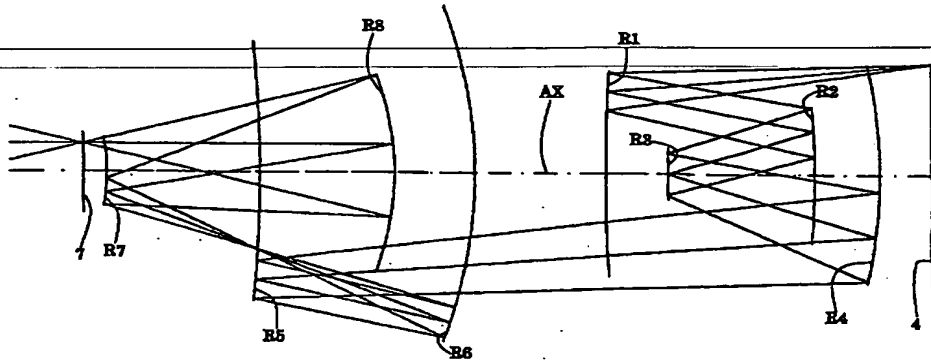
【図5】



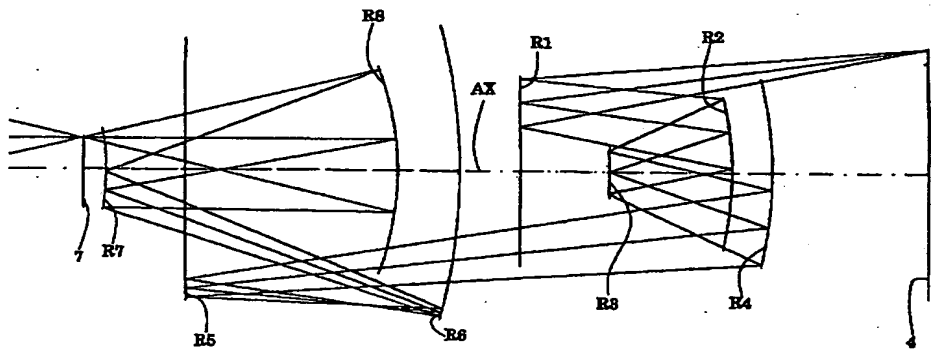
【図7】



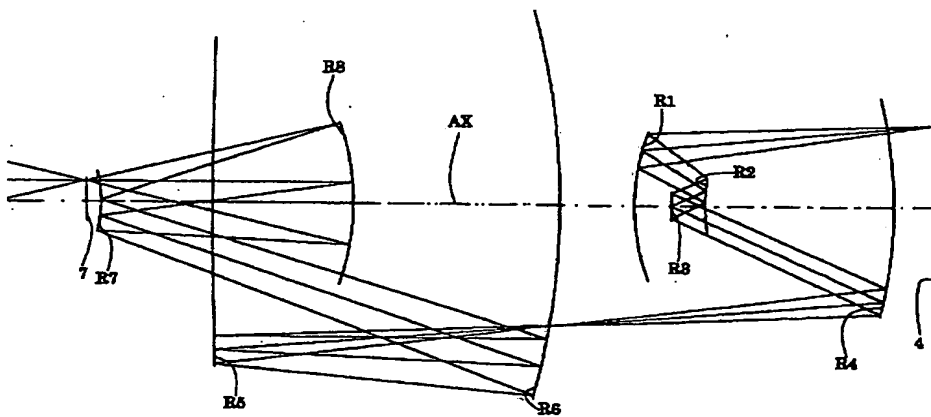
【図6】



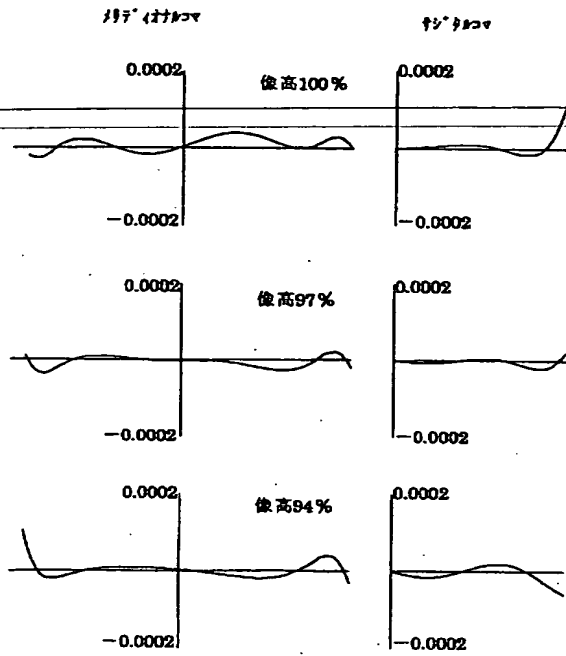
【図8】



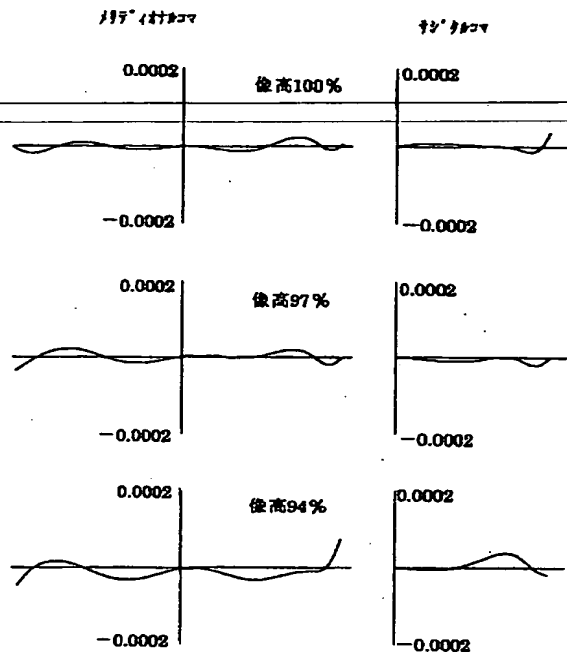
【図10】



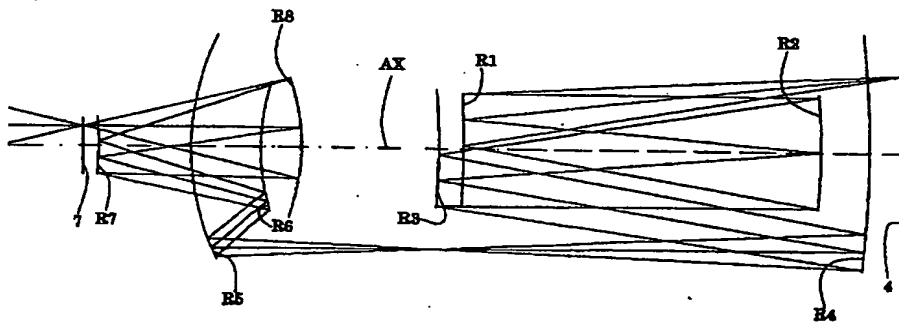
【図9】



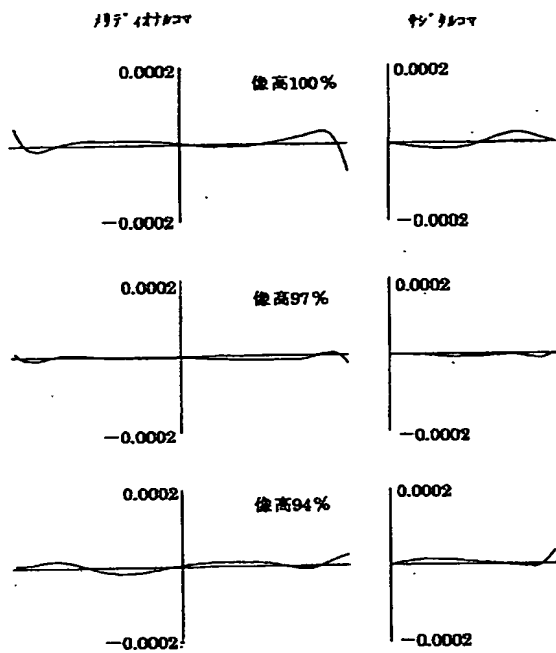
【図11】



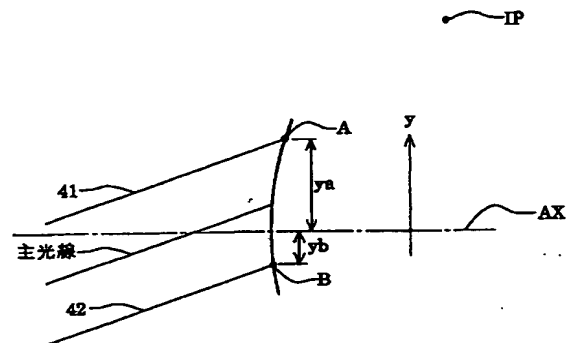
【図12】



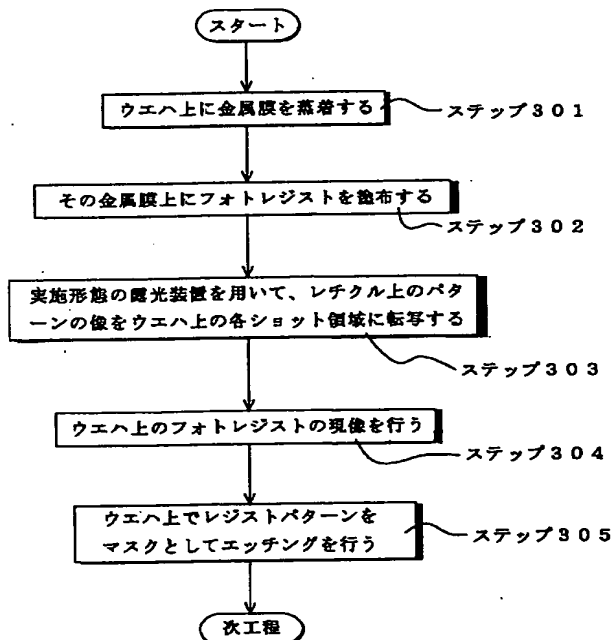
【図13】



【図14】



【図15】



(19) Japan Patent Office (JP)
(12) Publication of Laid-open Patent Application (A)
(11) Publication Number: P2002-116382A
(43) Date of publication of application: April 19, 2002

(51) Int.Cl.⁷
G02B 17/00 A
G03F 7/20 503
H01L 21/027

In house ref. nbr.

F I
G02B 17/00 A
G03F 7/20 503
H01L 21/30 531A

Theme code (reference)
2H087
2H097
5F046

Request for Examination: Not yet requested. The Number of Claims: 9. OL (Total 21 pages)

(21) Application number: P2000-305734

(22) Date of Filing : October 5, 2000

(71) Applicant:

ID number: 000004112

Name : Nikon corp.

Address : 3-2,3 Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo, Japan

(72) Inventor: KUMAGAI, Satoru

c/o Nikon corp.

3-2,3 Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo, Japan

(74) Attorney:

ID number: 100095256

Patent Attoreny:

Name : YAMAGUCHI, Takao

[F term (reference)]

2H087 KA21 TA02 TA06

2H097 AA02 AB09 BA10 CA15 EA01 GB00 LA10

5F046 GA03 GA06 GB01 GB07 GC03 GD10

(54) Title of the Invention: Projection optical system and exposure apparatus with projection optical system

(57) Abstract

[Subject]

A reflective projection optical system capable of making sufficient aberration corrections between an object surface and an entrance pupil, and consequently making excellent aberration corrections in the whole optical system.

[Means for solving]

A projection optical system forming an image of a first surface (4) on a second surface (7) includes a first reflecting surface R1, a second reflecting surface R2, a third reflecting surface R3, a fourth reflecting surface R4, a fifth reflecting surface R5, a sixth reflecting surface R6, a seventh reflecting surface R7 and an eighth reflecting surface and a position of the entrance pupil is set on the second surface side rather than in the vicinity of the first surface side of the second reflecting surface along the optical path from the first surface to the second surface.

[What is claimed]

[Claim 1]

5 A projection optical system for forming an image of a
first surface on a second surface, the projection
optical system comprising:

 a first reflective surface for reflecting light
from the first surface ;

10 a second reflecting surface for reflecting the
light reflected at the first reflecting surface;

 a third reflecting surface for reflecting the light
reflected at the second reflecting surface;

 a fourth reflecting surface for reflecting the
light reflected at the third reflecting surface;

15 a fifth reflecting surface for reflecting the light
reflected at the fourth reflecting surface;

 a sixth reflecting surface for reflecting the light
reflected at the fifth reflecting surface; and

20 a seventh reflecting surface for reflecting the
light reflected at the sixth reflecting surface toward
the second surface, wherein an entrance pupil position
in the projection optical system is set on a second
surface side of the second reflecting surface from the
vicinity of a first surface side of the second
25 reflecting surface along an optical path from the first
surface to the second surface.

[Claim 2]

The projection optical system set forth in claim 1,
wherein the entrance pupil position is set along an
optical path between the vicinity of the first surface
side of the second reflecting surface and the vicinity
of the second surface side of the third reflecting
surface along the optical path from the first surface to
the second surface.

[Claim 3]

The projection optical system set forth in claim 1 or
2, wherein, when the entrance pupil position is in the
vicinity of the first surface side of the second
reflecting surface along the optical path from the first
surface to the second surface, within a surface
including an optical axis and an image point, the y-
coordinate is set in a direction perpendicular to the
optical axis in such a manner that the same side as the
image point with respect to the optical axis becomes
positive, and, within the said surface, assuming that y-
coordinate values of an intersection point at which
light rays of the maximum numerical aperture and the
second reflecting surface intersect are defined as y_a
and y_b ($y_a > y_b$),
conditions of $-1 \leq \log\{-(y_a/y_b)\} \leq 1$ are satisfied.

[Claim 4]

The projection optical system set forth in claim 1,

wherein the entrance pupil position is set on the second reflecting surface or on a second surface side from the second reflecting surface along the optical path from the first surface to the second surface.

5 [Claim 5]

The projection optical system set forth in any one of claims 1 to 4, wherein the sixth reflecting surface is arranged between the fourth reflecting surface and the fifth reflecting surface, and a distance from the optical axis to a position at which light reflected at the fourth reflecting surface and traveling to the fifth reflecting surface passes through a virtual extension surface of the sixth reflecting surface is set so as to be smaller than a distance from the optical axis to a position at which light to be reflected at the sixth reflecting surface.

[Claim 6]

The projection optical system set forth in any one of claims 1 to 5, wherein the first to the seventh reflecting surfaces are arranged along a single optical axis.

[Claim 7]

An exposure apparatus comprising:
an illumination system for illuminating a mask; and
an projection optical system set forth in any one of claims 1 to 6 for projecting and exposing a pattern of

the mask onto a photosensitive substrate.

[Claim 8]

The exposure apparatus set forth in claim 7, wherein

the illumination system includes a light source for
5 supplying X-rays for exposure light, and projects and
exposes the pattern of the mask onto the photosensitive
substrate while causing the mask and the photosensitive
substrate to be moved relative to the projection optical
system.

10 [Claim 9]

A microdevice fabrication method comprising:

an exposure process of exposing the pattern of the
mask onto the photosensitive substrate by the exposure
apparatus set forth in claim 7 or 8; and

15 a development process of developing the photosensitive
substrate exposed by the exposure process.

[Detailed description of the Invention]

[0001]

[Field of the Invention]

20 The present invention relates to a projection optical
system and an exposure apparatus including the
projection optical system, and, for example, to a
reflective projection optical system suitable for an X-
ray projection exposure apparatus transferring a circuit
25 pattern on a mask onto a photosensitive substrate by a
mirror projection scheme using X-rays.

[0002]

[Conventional arts]

Conventionally, exposure apparatus used for
manufacturing semiconductor devices and the like have
5 projected and transferred circuit patterns formed on a
mask (photomask) onto the photosensitive substrate such
as a wafer through the projection optical system. A
photoresist is applied on the photosensitive substrate,
and a portion of the photoresist is exposed to light by
10 projection exposure through the projection optical
system, so that a photoresist pattern corresponding to a
mask pattern is yielded.

[0003]

Here, a resolving power W of an exposure apparatus
15 depends on a wavelength λ of exposure light and a
numerical aperture NA in the projection optical system,
and is represented by the following expression (a):

$$W = K \cdot \lambda / NA \quad (K: \text{constant}) \quad (a)$$

[0004]

20 Therefore, in order to improve the resolving power of
the exposure apparatus, it becomes necessary to shorten
the wavelength λ of the exposure light or increase the
numerical aperture NA in the projection optical system.
Generally, it is difficult to increase the numerical
25 aperture NA of the projection optical system to a
predetermined value or greater from the viewpoint of

optical designing, so the wavelength of the exposure light needs to be shortened from now on. For example, when a KrF excimer laser with 248 nm wavelength is used

5 as the exposure light, 0.25 μm resolving power is obtained, and when an ArF excimer laser with 193 nm wavelength is used as the exposure light, 0.18 μm resolving power is obtained, respectively. The resolving power can be further improved when X-rays having a wavelength shorter than these laser beams are
10 used as the exposure light. If an X-ray with a further shorter wavelength, for example, 13 nm wavelength is used as the exposure light, resolving power less than 0.1 μm can be obtained.

[0005]

15 Meanwhile, since there are no usable transmissive optical materials and refractive optical materials when X-rays are used as the exposure light, a reflective mask must be used, and concurrently a reflective projection optical system is required. Conventionally, as the
20 projection optical system applicable to the exposure apparatus using the X-ray as the exposure light, various reflective optical systems consisting of, for example, four to eight reflectors have been proposed.

[0006]

25 [Problems to be solved by the Invention]

With the conventional reflective optical system

consisting of four to six reflectors, however, the number of the reflectors employed therein are small so that there is a disadvantage that the sufficient

aberration correction cannot be made. Moreover, in the conventional projection optical system consisting of the eight reflectors, the entrance pupil in the optical system has been positioned considerably on the mask side from a second reflecting surface (which is a second reflector that light from the mask enters) along the optical path from the mask to the photosensitive substrate.

For this reason, the sufficient aberration correction cannot be made between the mask surface of the object surface and the entrance pupil, and consequently, there is another disadvantage that aberrations in a whole optical system cannot be excellently corrected.

[0007]

The present invention is made in view of the foregoing problems, and is aimed at providing a reflective projection optical system capable of making the sufficient aberration correction between the object surface and the entrance pupil, and consequently, making the excellent aberration correction in the whole projection optical system. Moreover, by applying a projection optical system of the present invention to an exposure apparatus, an object of the present invention

is to provide, for example, an exposure apparatus capable of securing high resolving power using X-rays as the exposure light. Another object of the present

invention is further to provide a microdevice
5 fabrication method capable of fabricating a high-precision microdevice under excellent exposure conditions by using an exposure apparatus having the high resolving power.

[0008]

10 [Means for solving the problems]

In order to solve the above problems, a first invention of the present invention provides a projection optical system that includes a first reflective surface for reflecting light from the first surface, a second
15 reflecting surface for reflecting the light reflected at the first reflecting surface, a third reflecting surface for reflecting the light reflected at the second reflecting surface, a fourth reflecting surface for reflecting the light reflected at the third reflecting
20 surface, a fifth reflecting surface for reflecting the light reflected at the fourth reflecting surface, a sixth reflecting surface for reflecting the light reflected at the fifth reflecting surface, and a seventh reflecting surface for reflecting the light reflected at
25 the sixth reflecting surface toward the second surface, wherein an entrance pupil position in the projection

optical system is set on a second surface side of the second reflecting surface from the vicinity of a first surface side of the second reflecting surface along an optical path from the first surface to the second surface.

[0009]

According a preferable embodiment of the first invention, the entrance pupil position is set along an optical path between the vicinity of the first surface side of the second reflecting surface and the vicinity of the second surface side of the third reflecting surface along an optical path from the first surface to the second surface.

[0010]

Also, according to a further preferable embodiment of the first invention, when the entrance pupil position is in the vicinity of the first surface side of the second reflecting surface along an optical path from the first surface to the second surface, within a surface including an optical axis and an image point, the y-coordinate is set in a direction perpendicular to the optical axis in such a manner that the same side as the image point with respect to the optical axis becomes positive, and, within the said surface, assuming that y-coordinate values of an intersection point at which light ray of the maximum numerical aperture and the

second reflecting surface intersect are defined as y_a and y_b ($y_a > y_b$) respectively, conditions of $-1 \leq \log\{-(y_a/y_b)\} \leq 1$ are satisfied.

[0011]

5 Further, according to a preferable embodiment of the first invention, the entrance pupil position is set on the second reflecting surface or on a second surface side from the second reflecting surface along the optical path from the first surface to the second
10 surface.

[0012]

Moreover, according to a preferable embodiment of the first invention, the sixth reflecting surface is arranged between the fourth reflecting surface and the
15 fifth reflecting surface, and a distance from the optical axis to a position at which light reflected at the fourth reflecting surface and traveling to the fifth reflecting surface passes through a virtual extension surface of the sixth reflecting surface is set so as to
20 be smaller than a distance from the optical axis to a position at which light to be reflected at the sixth reflecting surface. Also, the first reflecting surface to the seventh reflecting surface should be preferably arranged along a single optical axis.

25 [0013]

A second invention of the present invention provides

an exposure apparatus that includes an illumination system for illuminating a mask, and a projection optical system of the first invention for projecting and exposing a pattern of the mask onto a photosensitive substrate.

[0014]

According to a preferred embodiment of the second invention, the illumination system includes a light source for supplying X-rays for exposure light, and projects and exposes the pattern of the mask onto the photosensitive substrate while causing the mask and the photosensitive substrate to be moved relative to the projection optical system.

[0015]

A third invention of the present invention provides a microdevice fabrication method that includes an exposure process of exposing the pattern of the mask onto the photosensitive substrate by the exposure apparatus of the second invention, and a development process of developing the photosensitive substrate exposed by the exposure process.

[0016]

[Preferred embodiments of the Invention]

A projection optical system according to a typical example embodiment of the present invention includes eight reflectors. Accordingly, light from a first

surface (object surface) forms an image of the first surface on a second surface (image surface) after reflected in succession at a first reflecting surface, a

5 second reflecting surface, a third reflecting surface, a fourth reflecting surface, a fifth reflecting surface, a sixth reflecting surface, a seventh reflecting surface and an eighth reflecting surface. According to the present invention, in this basic structure, an entrance pupil position is set on a second surface side of the
10 second reflecting surface from the vicinity of a first surface side of the second reflecting surface along an optical path from the first surface to the second surface.

[0017]

15 More particularly, the entrance pupil position should be preferably set on an optical path between the vicinity of the first surface side of the second reflecting surface and the vicinity of the second surface side of the third reflecting surface along the
20 optical path from the first surface to the second surface. Or, the entrance pupil position should be preferably set on the second reflecting surface or on the second surface side from the second reflecting surface along the optical path from the first surface to
25 the second surface.

As in the foregoing, in the projection optical system

of the present invention, as the entrance pupil position is set on the second surface side of the second reflecting surface from the vicinity of the first

surface side of the second reflecting surface, it makes it possible to sufficiently correct aberrations between the object surface and the entrance pupil, and consequently, excellently correct aberrations in the whole optical system.

[0018]

Meanwhile, according to the present invention, when the entrance pupil position is in the vicinity of the first surface side of the second reflecting surface along the optical path from the first surface to the second surface, following conditional expression (1) is satisfied. In other words, by using following conditional expression (1), whether or not the entrance pupil position is in the vicinity of the first surface side of the second reflecting surface is judged.

$$-1 \leq \log_e \{-(y_a/y_b)\} \leq 1 \quad (1)$$

[0019]

Here, as shown in Fig. 14, within a surface including optical axis AX and image point IP, the y-coordinate is set in a direction perpendicular to optical axis AX in such a manner that the same side as image point IP becomes positive with respect to optical axis AX. In this case, the origin of the y-coordinate is on optical

axis AX. And, within the surface including optical axis AX and image point IP, y-coordinate values of intersection points A and B at which rays of light 41 and 42 of the maximum NA and the second reflecting surface intersect are defined as y_a and y_b ($y_a > y_b$), respectively. Also, \log_e denotes a natural logarithm.

[0020]

Moreover, according to the present invention, the sixth reflecting surface is arranged between the fourth reflecting surface and the fifth reflecting surface, and a distance from the optical axis to a position at which a ray of light, which is reflected at the fourth reflecting surface and travels to the fifth reflecting surface, passes through a virtual extension surface of the sixth reflecting surface should be preferably set so as to be smaller than a distance from the optical axis to a position at which a ray of light to be reflected at the sixth reflecting surface. With this structure, an outside diameter of a reflector having the fourth reflecting surface can be made smaller, and consequently, the whole optical system can be made smaller and compact in terms of the diameter.

[0021]

When the reflective projection optical system of the present invention is employed in the projection optical system of the exposure apparatus, X-rays can be used as

exposure light. In this case, while causing the mask and photosensitive substrate to be moved relative to the projection optical system, the pattern of the mask is projected and exposed onto the photosensitive substrate.

5 As a result, high-precision microdevices can be fabricated under the excellent exposure conditions by using a scanning exposure apparatus with a high resolving power.

[0022]

10 Preferred example embodiments of the present invention will be described with reference to the accompanying drawings. Fig. 1 is a diagram schematically showing a structure of an exposure apparatus according to an example embodiment of the present invention. In Fig. 1,
15 the Z-axis is set along an optical axis direction of the projection optical system, that is, along a normal direction of the wafer, the photosensitive substrate, the Y-axis is set in a direction parallel to the sheet surface of Fig. 1 within a wafer surface and the X-axis
20 is set in a direction perpendicular to the sheet surface of Fig. 1 within the wafer surface, respectively.

[0023]

The exposure apparatus of Fig. 1 is provided with laser plasma X-ray source 1 as a light source for
25 supplying exposure light, for example. Light emitted from X-ray source 1 enters illumination optical system 3

through wavelength-selective filter 2. Here, wavelength-selective filter 2 has such a characteristic as to permit only an X-ray with a predetermined wavelength (13.4 nm) from the light supplied from X-ray source 1 to selectively pass through, and prevents other wavelengths from passing through.

[0024]

The X-ray passing through wavelength-selective filter 2 illuminates reflective mask 4 formed with patterns to be transferred through illumination optical system 3 consisting of a plurality of reflectors. Mask 4 is held by mask stage 5 movable along the Y-axis in such a manner that its pattern surface extends along the XY plane. Furthermore, a movement of mask stage 5 is configured so as to be measured by a laser interferometer which is not shown here. Thus, an arc-like illumination area symmetrical about the Y-axis is formed on mask 4.

[0025]

Through reflective projection optical system 6, light from a pattern of illuminated mask 3 forms an image of the mask pattern on wafer 7 which is a photosensitive substrate. Wafer 7 is held by wafer stage 8 movable in a two-dimensional way along the XY axes in such a manner that its exposure surface extends along the XY plane. Furthermore, a movement of wafer stage 8 is configured

so as to be measured by the laser interferometer, which is not shown here, like mask stage 5.

[0026]

Accordingly, scan exposure (scanning exposure) is performed while moving mask stage 5 and wafer stage 8 along the Y-axis, that is, while moving mask 4 and wafer 7 along the Y-axis relative to projection optical system 6, so that the pattern of mask 4 is transferred into one exposure area of wafer 7. At this moment, assuming that a projection magnification (transfer magnification) in projection optical system 6 is $1/4$, synchronous scanning is performed with the movement rate of wafer stage 8 set to one fourth of the movement rate of mask stage 5.

[0027]

Furthermore, as the scanning exposure is repeated while moving wafer stage 8 in the two-dimensional way along the X and Y axes, the patterns of mask 4 are successively transferred into respective exposure areas of wafer 7. Referring to example embodiments 1 to 6, specific structures of projection optical system 6 will be described below.

[0028]

In each example embodiment, projection optical system 6 consists of eight reflectors CM1 to CM8. That is, light from mask 4 forms a mask pattern image on wafer 7 after successively reflected at reflecting surface R1 of

first reflector CM 1, reflecting surface R2 of second reflector CM 2, reflecting surface R3 of third reflector CM 3, reflector surface R4 of fourth reflector CM 4,

reflecting surface R5 of fifth reflector CM 5, reflecting surface R6 of sixth reflector CM 6, reflecting surface R7 of seventh reflector CM 7 and reflecting surface R8 of eighth reflector CM 8.

Furthermore, all reflecting surfaces R1 to R8 are formed in an aspherical shape. Also, in respective example embodiments, the entrance pupil in the optical system is configured so as to be positioned on second reflecting surface R2 or on a wafer side from the second reflecting surface.

[0029]

In each following embodiment, an aspheric surface is represented by the following expression (b):

Expression 1

$$z = (y^2/r) / \left\{ 1 + \left\{ 1 - (1+\kappa) \cdot y^2/r^2 \right\}^{1/2} \right\} + C4 \cdot y^4 + C6 \cdot y^6 + C8 \cdot y^8 + C10 \cdot y^{10} + \dots \quad (b)$$

where the height of the aspheric surface in a direction perpendicular to the optical axis is y, the distance (sag amount) along the optical axis from a tangential surface at the vertex of the aspheric surface to the position on the aspheric surface at the height y is z, the vertex radius of curvature is r, a conic coefficient is κ , and the aspherical surface coefficient of the n-th

order is C_n , respectively.

[0030] [First embodiment]

Fig. -2 is a diagram showing a structure of a projection optical system in accordance with a first example embodiment of the example embodiments. Referring to Fig. 2, the light from mask 4 in the projection optical system of the first example embodiment forms a reduced image of the mask pattern on wafer 7 through concave reflecting surface R1 of first reflector CM1, convex reflecting surface R2 of second reflector CM2, convex reflecting surface R3 of third reflector CM3, concave reflecting surface R4 of fourth reflector CM4, concave reflecting surface R5 of fifth reflector CM5, concave reflecting surface R6 of sixth reflector CM6, convex reflecting surface R7 of seventh reflector CM7 and concave reflecting surface R8 of eighth reflector CM8. According to the first example embodiment, the entrance pupil in the optical system is configured so as to be positioned on third reflecting surface R3.

[0031]

The following Table 1 shows values of items regarding the projection optical system of the first example embodiment. In Table 1, λ denotes a wavelength of exposure light, and β denotes a projection magnification (transfer magnification), respectively. The surface

number denotes the order of reflecting surfaces from the mask side along a direction of the ray of light traveling from the mask surface acting as the object

surface to the wafer surface acting as the image surface,

5 r denotes a radius of curvature at the vertex of each reflecting surface (mm), and d denotes an axial spacing of each reflecting surface, i.e., surface separation (mm), respectively. Surface separation d is supposed to change its code each time when reflected. Regardless of
10 the incidence direction of the ray of light, radii of curvature of surfaces being convex to the mask side are defined positive and radii of curvature of surfaces being concave to the mask side are defined negative, respectively.

15 [0032]

[Table 1]

(Principle items)

$\lambda = 13.4 \text{ nm}$

$\beta = 1/4$

20 (Items regarding optical elements)

Surface No.	r	d
-------------	---	---

(Mask surface)	362.513162	
----------------	------------	--

1	-302.93934	-90.018587 (1st reflecting surface R1)
---	------------	--

2	-370.67510	45.295314 (2nd reflecting surface R2)
---	------------	---------------------------------------

25	3	598.77300	-158.501234 (3rd reflecting surface R3)
----	---	-----------	---

	4	472.05608	765.865368 (4th reflecting surface R4)
--	---	-----------	--

5 -2045.09307 -321.519505 (5th reflecting surface R5)

6 1225.38595 482.551711 (6th reflecting surface R6)

7 202.62044 -313.137886 (7th reflecting surface R7)

8 371.36809 333.137886 (8th reflecting surface R8)

5 (Wafer surface)

(Data of aspheric surfaces)

First surface

$\kappa = 0.000000$

$C4 = +0.233951 \times 10^{-8}$

10 $C6 = +0.497703 \times 10^{-13}$

$C8 = +0.851811 \times 10^{-18}$

$C10 = +0.760736 \times 10^{-23}$

Second surface

15 $\kappa = 0.000000$

$C4 = +0.600389 \times 10^{-7}$

$C6 = -0.557800 \times 10^{-11}$

$C8 = +0.176763 \times 10^{-15}$

$C10 = +0.415572 \times 10^{-20}$

20

Third surface

$\kappa = 0.000000$

$C4 = -0.362683 \times 10^{-7}$

$C6 = -0.592352 \times 10^{-12}$

25 $C8 = +0.766738 \times 10^{-14}$

$C10 = -0.429557 \times 10^{-17}$

Fourth surface

$\kappa=0.000000$

5

$$C4 = -0.345494 \times 10^{-9}$$
$$C6 = +0.332528 \times 10^{-14}$$
$$C8 = -0.585963 \times 10^{-21}$$
$$C10 = -0.888898 \times 10^{-24}$$

Fifth surface

10

$$\kappa=0.000000$$
$$C4 = +0.204498 \times 10^{-9}$$
$$C6 = +0.782755 \times 10^{-14}$$
$$C8 = -0.446431 \times 10^{-19}$$
$$C10 = +0.198671 \times 10^{-24}$$

15

Sixth surface

$$\kappa=0.000000$$
$$C4 = +0.362063 \times 10^{-9}$$
$$C6 = +0.308956 \times 10^{-14}$$

20

$$C8 = -0.124229 \times 10^{-19}$$
$$C10 = +0.515926 \times 10^{-25}$$

Seventh surface

$$\kappa=0.000000$$

25

$$C4 = +0.586897 \times 10^{-7}$$
$$C6 = +0.278165 \times 10^{-11}$$

$$C8 = +0.184001 \times 10^{-15}$$

$$C10 = +0.990070 \times 10^{-20}$$

Eighth surface

5 $\kappa = 0.000000$

$$C4 = +0.180870 \times 10^{-9}$$

$$C6 = +0.157395 \times 10^{-14}$$

$$C8 = +0.124208 \times 10^{-19}$$

$$C10 = +0.207770 \times 10^{-24}$$

10 [0033]

Fig. 3 is a view showing coma generated by the projection optical system of the first example. Fig. 3 shows meridional coma and sagittal coma at image heights of 100%, 97%, and 94%, respectively. As clearly seen from the aberration chart, the first embodiment verifies that the coma is excellently corrected. Not being shown here, though, it is also verified that aberrations other than the coma are excellently corrected.

15

[0034] [Embodiment 2]

20

Fig. 4 is a diagram showing a structure of a projection optical system in accordance with a second example of this embodiment. Referring to Fig. 4, the light from mask 4 in the projection optical system of the second example embodiment forms the reduced image of the mask pattern on wafer 7 through concave reflecting surface R1 of first reflector CM1, concave reflecting

25

surface R2 of second reflector CM2, convex reflecting
surface R3 of third reflector CM3, concave reflecting
surface R4 of fourth reflector CM4, concave reflecting

surface R5 of fifth reflector CM5, convex reflecting

5 surface R6 of sixth reflector CM6, convex reflecting
surface R7 of seventh reflector CM7 and concave
reflecting surface R8 of eighth reflector CM8.

According to the second example embodiment, the entrance
pupil in the optical system is configured so as to be
10 positioned on second reflecting surface R2. In Fig. 4,
each of reflectors CM1 to CM 8 is omitted to be shown.

[0035]

The following Table 2 shows values of items regarding
the projection optical system of the second example
15 embodiment. In Table 2, λ denotes a wavelength of
exposure light, and β denotes a projection magnification
(transfer magnification), respectively. The surface
number denotes the order of reflecting surfaces from the
mask side along a direction of the ray of light
20 traveling from the mask surface acting as the object
surface to the wafer surface acting as the image surface,
 r denotes the radius of curvature at the vertex of each
reflecting surface (mm), and d denotes the axial spacing
of each reflecting surface, i.e., surface separation
25 (mm), respectively. Surface separation d is supposed to
change its code each time when reflected. Regardless of

the incidence direction of the ray of light, radii of curvature of surfaces being convex to the mask side are defined positive and radii of curvature of surfaces

being concave to the mask side are defined negative, respectively.

[0036]

[Table 2]

(Principle items)

$\lambda = 13.4 \text{ nm}$

$\beta = 1/4$

(Items regarding optical elements)

Surface No.	r	d
(Mask surface)		414.867263
1	-981.67890	-259.284927 (1st reflecting surface R1)
2	1337.58951	143.049955 (2nd reflecting surface R1)
3	316.43313	-248.632300 (3rd reflecting surface R1)
4	637.54556	665.713542 (4th reflecting surface R1)
5	-474.03429	-104.854022 (5th reflecting surface R1)
6	-483.71464	213.536974 (6th reflecting surface R1)
7	300.89234	-268.605883 (7th reflecting surface R1)
8	324.67446	306.527906 (8th reflecting surface R1)

(Wafer surface)

(Data of aspheric surfaces)

First surface

$\kappa = 0.000000$

$C4 = -0.138759 \times 10^{-8}$

$$C6 = +0.210310 \times 10^{-13}$$

$$C8 = -0.141560 \times 10^{-18}$$

$$C10 = -0.219913 \times 10^{-24}$$

5 Second surface

$$\kappa = 0.000000$$

$$C4 = +0.166932 \times 10^{-7}$$

$$C6 = +0.141755 \times 10^{-11}$$

$$C8 = +0.971265 \times 10^{-16}$$

10 $C10 = +0.995857 \times 10^{-20}$

Third surface

$$\kappa = 0.000000$$

$$C4 = -0.891216 \times 10^{-8}$$

15 $C6 = +0.658862 \times 10^{-12}$

$$C8 = -0.491378 \times 10^{-17}$$

$$C10 = +0.628038 \times 10^{-21}$$

Fourth surface

20 $\kappa = 0.000000$

$$C4 = -0.237356 \times 10^{-9}$$

$$C6 = +0.521596 \times 10^{-15}$$

$$C8 = +0.663314 \times 10^{-20}$$

$$C10 = -0.532651 \times 10^{-26}$$

25

Fifth surface

$$\kappa = 0.000000$$

$$C4 = +0.183804 \times 10^{-8}$$

$$C6 = +0.188427 \times 10^{-14}$$

$$C8 = +0.140439 \times 10^{-18}$$

$$5 \quad C10 = -0.882067 \times 10^{-25}$$

Sixth surface

$$\kappa = 0.000000$$

$$C4 = +0.155806 \times 10^{-7}$$

$$10 \quad C6 = -0.492169 \times 10^{-12}$$

$$C8 = +0.242400 \times 10^{-16}$$

$$C10 = -0.500124 \times 10^{-21}$$

Seventh surface

$$15 \quad \kappa = 0.000000$$

$$C4 = +0.995873 \times 10^{-7}$$

$$C6 = +0.261379 \times 10^{-11}$$

$$C8 = +0.253566 \times 10^{-15}$$

$$C10 = +0.807092 \times 10^{-19}$$

20

Eighth surface

$$\kappa = 0.000000$$

$$C4 = -0.626798 \times 10^{-10}$$

$$C6 = -0.536929 \times 10^{-15}$$

$$25 \quad C8 = -0.131253 \times 10^{-19}$$

$$C10 = -0.474237 \times 10^{-24}$$

[0037]

Fig. 5 is a view showing coma generated by the projection optical system of the second example

embodiment. Fig. 5 shows meridional coma and sagittal
5 coma at image heights of 100%, 97%, and 94%,
respectively. As clearly seen from the aberration chart,
even the second embodiment verifies that the coma is
excellently corrected in the same way as in the first
embodiment. Also, not being shown here, though, it is
10 also verified that aberrations other than the coma are
excellently corrected.

[0038] [Embodiment 3]

Fig. 6 is a diagram showing a structure of a
projection optical system in accordance with a third
15 example of this embodiment. Referring to Fig. 6, the
light from mask 4 in the projection optical system of
the third example embodiment forms the reduced image of
the mask pattern on wafer 7 through concave reflecting
surface R1 of first reflector CM1, concave reflecting
20 surface R2 of second reflector CM2, convex reflecting
surface R3 of third reflector CM3, concave reflecting
surface R4 of fourth reflector CM4, convex reflecting
surface R5 of fifth reflector CM5, concave reflecting
surface R6 of sixth reflector CM6, convex reflecting
25 surface R7 of seventh reflector CM7 and concave
reflecting surface R8 of eighth reflector CM8.

According to the third example embodiment, the entrance pupil in the optical system is configured so as to be positioned on third reflecting surface R3. In Fig. 6, each of reflectors CM1 to CM 8 is omitted to be shown.

5 [0039]

10 The following Table 3 shows values of items regarding the projection optical system of the third example embodiment. In Table 3, λ denotes a wavelength of exposure light, and β denotes a projection magnification (transfer magnification), respectively. The surface number denotes the order of reflecting surfaces from the mask side along a direction of the ray of light traveling from the mask surface acting as the object surface to the wafer surface acting as the image surface,

15 r denotes the radius of curvature at the vertex of each reflecting surface (mm), and d denotes the axial spacing of each reflecting surface, i.e., surface separation (mm), respectively. Surface separation d is supposed to change its code each time when reflected. Regardless of

20 the incidence direction of the ray of light, radii of curvature of surfaces being convex to the mask side are defined positive and radii of curvature of surfaces being concave to the mask side are defined negative, respectively.

25 [0040]

[Table 3]

(Principle items)

$$\lambda = 13.4\text{nm}$$

$$\beta = 1/4$$

(Items regarding optical elements)

5

Surface No. r d

(Mask surface) 318.549506

1 -2404.79993 -205.222555 (1st reflecting surface R 1)

2 763.64299 143.883971 (2nd reflecting surface R 2)

3 284.85995 -207.210933 (3rd reflecting surface R 3)

10

4 562.05981 611.273283 (4th reflecting surface R 4)

5 1712.84079 -213.065615 (5th reflecting surface R 5)

6 544.56386 363.442359 (6th reflecting surface R 6)

7 232.24531 -283.351415 (7th reflecting surface R 7)

8 327.20625 306.745621 (8th reflecting surface R 8)

15

(Wafer surface)

(Data of aspheric surfaces)

First surface

$$\kappa = 0.000000$$

$$C4 = -0.545411 \times 10^{-8}$$

20

$$C6 = +0.223041 \times 10^{-13}$$

$$C8 = +0.162396 \times 10^{-18}$$

$$C10 = -0.564415 \times 10^{-23}$$

Second surface

25

$$\kappa = 0.000000$$

$$C4 = -0.825111 \times 10^{-8}$$

$$C6 = -0.455352 \times 10^{-13}$$

$$C8 = +0.136019 \times 10^{-18}$$

$$C10 = -0.629949 \times 10^{-22}$$

5 Third surface

$$\kappa = 0.000000$$

$$C4 = -0.301775 \times 10^{-7}$$

$$C6 = +0.754443 \times 10^{-13}$$

$$C8 = +0.539533 \times 10^{-16}$$

10 $C10 = -0.147806 \times 10^{-19}$

Fourth surface

$$\kappa = 0.000000$$

$$C4 = -0.681896 \times 10^{-9}$$

15 $C6 = -0.328856 \times 10^{-14}$

$$C8 = -0.252789 \times 10^{-19}$$

$$C10 = -0.428046 \times 10^{-25}$$

Fifth surface

20 $\kappa = 0.000000$

$$C4 = +0.981718 \times 10^{-9}$$

$$C6 = -0.600138 \times 10^{-14}$$

$$C8 = -0.829770 \times 10^{-19}$$

$$C10 = +0.130869 \times 10^{-23}$$

25

Sixth surface

$$\kappa=0.000000$$

$$C4=+0.463677 \times 10^{-9}$$

$$C6=+0.117597 \times 10^{-15}$$

$$C8=-0.160435 \times 10^{-19}$$

$$5 \quad C10=+0.289024 \times 10^{-24}$$

Seventh surface

$$\kappa=0.000000$$

$$C4=+0.872492 \times 10^{-7}$$

$$10 \quad C6=+0.783801 \times 10^{-11}$$

$$C8=+0.939959 \times 10^{-16}$$

$$C10=+0.650230 \times 10^{-19}$$

Eighth surface

$$15 \quad \kappa=0.000000$$

$$C4=+0.161940 \times 10^{-9}$$

$$C6=+0.200482 \times 10^{-14}$$

$$C8=+0.230772 \times 10^{-19}$$

$$C10=+0.192764 \times 10^{-24}$$

20 [0041]

Fig. 7 is a view showing coma generated by the projection optical system of the third example embodiment. Fig. 7 shows meridional coma and sagittal coma at image heights of 100%, 97%, and 94%, respectively. As clearly seen from the aberration chart, even the third embodiment verifies that the coma is

excellently corrected in the same way as in the first and second embodiments. Also, not being shown here, though, it is also verified that aberrations other than the coma are excellently corrected.

5 [0042] [Fourth embodiment]

Fig. 8 is a diagram showing a structure of a projection optical system in accordance with a fourth example of this embodiment. Referring to Fig. 8, the light from mask 4 in the projection optical system of the third example embodiment forms the reduced image of the mask pattern on wafer 7 through convex reflecting surface R1 of first reflector CM1, concave reflecting surface R2 of second reflector CM2, convex reflecting surface R3 of third reflector CM3, concave reflecting surface R4 of fourth reflector CM4, concave reflecting surface R5 of fifth reflector CM5, concave reflecting surface R6 of sixth reflector CM6, convex reflecting surface R7 of seventh reflector CM7 and concave reflecting surface R8 of eighth reflector CM8.

10

15

20 According to the fourth example embodiment, the entrance pupil in the optical system is configured so as to be positioned on third reflecting surface R3. In Fig. 8, each of reflectors CM1 to CM 8 is omitted to be shown.

[0043]

25 The following Table 4 shows values of items regarding the projection optical system of the fourth example

embodiment. In Table 3, λ denotes a wavelength of exposure light, and β denotes a projection magnification (transfer magnification), respectively. The surface

number denotes the order of reflecting surfaces from the mask side along a direction of the ray of light traveling from the mask surface acting as the object surface to the wafer surface acting as the image surface, r denotes the radius of curvature at the vertex of each reflecting surface (mm), and d denotes the axial spacing of each reflecting surface, i.e., surface separation (mm), respectively. Surface separation d is supposed to change its code each time when reflected. Regardless of the incidence direction of the ray of light, radii of curvature of surfaces being convex to the mask side are defined positive and radii of curvature of surfaces being concave to the mask side are defined negative, respectively.

[0044]

[Table 4]

(Principle items)

$\lambda = 13.4\text{nm}$

$\beta = 1/4$

(Items regarding optical elements)

Surface No. r d

(Mask surface) 355.178664

1 7000.00000 -184.529990 (1st reflecting surface R 1)

2	357.50053	105.786452	(2nd reflecting surface R 2)
3	171.42264	-140.765892	(3rd reflecting surface R 3)
4	429.87840	513.880742	(4th reflecting surface R 4)
<hr/>			
5	-7000.00000	-241.299921	(5th reflecting surface R 5)
6	591.25546	309.115334	(6th reflecting surface R 6)
7	235.55238	-254.220109	(7th reflecting surface R 7)
8	305.96266	274.220109	(8th reflecting surface R 8)

(Wafer surface)

(Data of aspheric surfaces)

10

First surface

$\kappa = 0.000000$

$C4 = -0.598452 \times 10^{-8}$

$C6 = -0.137754 \times 10^{-13}$

$C8 = +0.476250 \times 10^{-18}$

15

$C10 = -0.133648 \times 10^{-22}$

Second surface

$\kappa = 0.000000$

$C4 = -0.690445 \times 10^{-8}$

20

$C6 = -0.289971 \times 10^{-13}$

$C8 = -0.115360 \times 10^{-16}$

$C10 = -0.151551 \times 10^{-21}$

Third surface

25

$\kappa = 0.000000$

$C4 = -0.473187 \times 10^{-7}$

$$C6 = +0.339852 \times 10^{-12}$$

$$C8 = +0.157642 \times 10^{-15}$$

$$C10 = +0.843742 \times 10^{-19}$$

5 Fourth surface

$$\kappa = 0.000000$$

$$C4 = -0.234100 \times 10^{-8}$$

$$C6 = -0.168929 \times 10^{-13}$$

$$C8 = -0.218648 \times 10^{-18}$$

10 $C10 = -0.596612 \times 10^{-23}$

Fifth surface

$$\kappa = 0.000000$$

$$C4 = +0.932160 \times 10^{-9}$$

15 $C6 = -0.344879 \times 10^{-13}$

$$C8 = +0.887819 \times 10^{-18}$$

$$C10 = -0.130370 \times 10^{-22}$$

Sixth surface

20 $\kappa = 0.000000$

$$C4 = +0.141487 \times 10^{-8}$$

$$C6 = -0.754384 \times 10^{-13}$$

$$C8 = +0.181519 \times 10^{-17}$$

$$C10 = -0.188727 \times 10^{-22}$$

25

Seventh surface

$\kappa = 0.000000$

$C4 = +0.497794 \times 10^{-7}$

$C6 = +0.797436 \times 10^{-11}$

$C8 = -0.213306 \times 10^{-14}$

5 $C10 = +0.154617 \times 10^{-18}$

Eighth surface

$\kappa = 0.000000$

$C4 = +0.455892 \times 10^{-9}$

10 $C6 = +0.623196 \times 10^{-14}$

$C8 = +0.824642 \times 10^{-19}$

$C10 = +0.134139 \times 10^{-23}$

[0045]

15 Fig. 9 is a view showing coma generated by the projection optical system of the third example embodiment. Fig. 9 shows meridional coma and sagittal coma at image heights of 100%, 97%, and 94%, respectively. As clearly seen from the aberration chart, even the fourth embodiment verifies that the coma is

20 excellently corrected in the same way as in the first to third embodiments. Also, not being shown here, though, it is also verified that aberrations other than the coma are excellently corrected.

[0046] [Fifth embodiment]

25 Fig. 10 is a diagram showing a structure of a projection optical system in accordance with a fifth

example of this embodiment. Referring to Fig. 10, the light from mask 4 in the projection optical system of the third example embodiment forms the reduced image of

5 the mask pattern on wafer 7 through concave reflecting surface R1 of first reflector CM1, convex reflecting surface R2 of second reflector CM2, concave reflecting surface R3 of third reflector CM3, concave reflecting surface R4 of fourth reflector CM4, concave reflecting surface R5 of fifth reflector CM5, concave reflecting
10 surface R6 of sixth reflector CM6, convex reflecting surface R7 of seventh reflector CM7 and concave reflecting surface R8 of eighth reflector CM8. According to the fifth example embodiment, the entrance pupil in the optical system is configured so as to be positioned on third reflecting surface R3. In Fig. 10,
15 each of reflectors CM1 to CM 8 is omitted to be shown.

[0047]

The following Table 5 shows values of items regarding the projection optical system of the fourth example
20 embodiment. In Table 3, λ denotes a wavelength of exposure light, and β denotes a projection magnification (transfer magnification), respectively. The surface number denotes the order of reflecting surfaces from the mask side along a direction of the ray of light
25 traveling from the mask surface acting as the object surface to the wafer surface acting as the image surface,

r denotes the radius of curvature at the vertex of each reflecting surface (mm), and d denotes the axial spacing of each reflecting surface, i.e., surface separation

(mm), respectively. Surface separation d is supposed to change its code each time when reflected. Regardless of the incidence direction of the ray of light, radii of curvature of surfaces being convex to the mask side are defined positive and radii of curvature of surfaces being concave to the mask side are defined negative, respectively.

[0048]

[Table 4]

(Principle items)

$\lambda = 13.4\text{nm}$

$\beta = 1/4$

(Items regarding optical elements)

Surface No. r d

(Mask surface) 398.983276

1 -317.52637 -94.239390 (1st reflecting surface R 1)

2 -296.06855 44.928035 (2nd reflecting surface R 2)

3 -5000.00000 -294.204004 (3rd reflecting surface R 3)

4 751.85563 906.398723 (4th reflecting surface R 4)

5 -5988.20667 -462.129326 (5th reflecting surface R 5)

6 1264.06144 609.604166 (6th reflecting surface R 6)

7 213.09621 -334.049468 (7th reflecting surface R 7)

8 397.27735 354.049468 (8th reflecting surface R 8)

(Wafer surface)

(Data of aspheric surfaces)

First surface

$\kappa = 0.000000$

5 $C4 = +0.238899 \times 10^{-8}$
 $C6 = +0.530727 \times 10^{-13}$
 $C8 = +0.102960 \times 10^{-17}$
 $C10 = +0.341571 \times 10^{-23}$

10 second surface

$\kappa = 0.000000$

$C4 = +0.704634 \times 10^{-7}$
 $C6 = -0.615324 \times 10^{-11}$
 $C8 = +0.936665 \times 10^{-16}$
15 $C10 = +0.326427 \times 10^{-19}$

Third surface

$\kappa = 0.000000$

$C4 = -0.155874 \times 10^{-7}$
20 $C6 = +0.323391 \times 10^{-12}$
 $C8 = +0.343680 \times 10^{-14}$
 $C10 = -0.103463 \times 10^{-17}$

Fourth surface

25 $\kappa = 0.000000$
 $C4 = +0.210169 \times 10^{-10}$

$$C6 = -0.134478 \times 10^{-15}$$

$$C8 = +0.251514 \times 10^{-19}$$

$$C10 = -0.303783 \times 10^{-24}$$

5 Fifth surface

$$\kappa = 0.000000$$

$$C4 = +0.233635 \times 10^{-9}$$

$$C6 = +0.316884 \times 10^{-14}$$

$$C8 = -0.129819 \times 10^{-19}$$

10 $C10 = +0.518992 \times 10^{-25}$

Sixth surface

$$\kappa = 0.000000$$

$$C4 = +0.164370 \times 10^{-9}$$

15 $C6 = +0.767827 \times 10^{-15}$

$$C8 = -0.146283 \times 10^{-20}$$

$$C10 = +0.416910 \times 10^{-26}$$

Seventh surface

20 $\kappa = 0.000000$

$$C4 = +0.479273 \times 10^{-7}$$

$$C6 = +0.170344 \times 10^{-11}$$

$$C8 = +0.950581 \times 10^{-16}$$

$$C10 = +0.138644 \times 10^{-20}$$

25

Eighth surface

$\kappa = 0.000000$

$C4 = +0.150982 \times 10^{-9}$

$C6 = +0.118318 \times 10^{-14}$

$C8 = +0.854121 \times 10^{-20}$

5 $C10 = +0.129800 \times 10^{-24}$

[0049]

Fig. 11 is a view showing coma generated by the projection optical system of the third example embodiment. Fig. 11 shows meridional coma and sagittal
10 coma at image heights of 100%, 97%, and 94%, respectively. As clearly seen from the aberration chart, even the fifth embodiment verifies that the coma is excellently corrected in the same way as in the first to fourth embodiments. Also, not being shown here, though,
15 it is also verified that aberrations other than the coma are excellently corrected.

[0050] [Sixth embodiment]

Fig. 12 is a diagram showing a structure of a projection optical system in accordance with a fourth
20 example of this embodiment. Referring to Fig. 12, the light from mask 4 in the projection optical system of the sixth example embodiment forms the reduced image of the mask pattern on wafer 7 through convex reflecting surface R1 of first reflector CM1, concave reflecting
25 surface R2 of second reflector CM2, convex reflecting surface R3 of third reflector CM3, concave reflecting

surface R4 of fourth reflector CM4, concave reflecting
surface R5 of fifth reflector CM5, convex reflecting
surface R6 of sixth reflector CM6, convex reflecting
surface R7 of seventh reflector CM7 and concave
reflecting surface R8 of eighth reflector CM8.
According to the sixth example embodiment, the entrance
pupil in the optical system is configured so as to be
positioned on second reflecting surface R2. In Fig. 12,
each of reflectors CM 1 to CM 8 is omitted to be shown.

[0051]

The following Table 6 shows values of items regarding
the projection optical system of the fourth example
embodiment. In Table 6, λ denotes a wavelength of
exposure light, and β denotes a projection magnification
(transfer magnification), respectively. The surface
number denotes the order of reflecting surfaces from the
mask side along a direction of the ray of light
traveling from the mask surface acting as the object
surface to the wafer surface acting as the image surface,
 r denotes the radius of curvature at the vertex of each
reflecting surface (mm), and d denotes the axial spacing
of each reflecting surface, i.e., surface separation
(mm), respectively. Surface separation d is supposed to
change its code each time when reflected. Regardless of
the incidence direction of the ray of light, radii of
curvature of surfaces being convex to the mask side are

defined positive and radii of curvature of surfaces being concave to the mask side are defined negative, respectively.

[0052]

5 [Table 6]

(Principle items)

$\lambda = 13.4\text{nm}$

$\beta = 1/4$

(Items regarding optical elements)

10 Surface No. r d

(Mask surface) 619.919792

1 2853.63937 -503.669649 (1st reflecting surface R 1)

2 971.62862 538.579512 (2nd reflecting surface R 2)

3 1180.36783 -604.829661 (3rd reflecting surface R 3)

15 4 1742.42693 952.024453 (4th reflecting surface R 4)

5 -409.39322 -97.171877 (5th reflecting surface R 5)

6 -334.54066 226.989209 (6th reflecting surface R 6)

7 375.95002 -284.488510 (7th reflecting surface R 7)

8 355.86799 306.647445 (8th reflecting surface R 8)

20 (Wafer surface)

(Data of aspheric surfaces)

First surface

$\kappa = 0.000000$

$C4 = -0.513849 \times 10$

25 $C6 = +0.154394 \times 10^{-13}$

$C8 = -0.531516 \times 10^{-19}$

$$C10 = +0.374663 \times 10^{-24}$$

Second surface

$$\kappa = 0.000000$$

5

$$C4 = -0.190894 \times 10^{-9}$$

$$C6 = -0.227357 \times 10^{-14}$$

$$C8 = -0.247734 \times 10^{-19}$$

$$C10 = -0.199472 \times 10^{-24}$$

10

Third surface

$$\kappa = 0.000000$$

$$C4 = -0.499244 \times 10^{-9}$$

$$C6 = -0.789053 \times 10^{-15}$$

$$C8 = -0.480158 \times 10^{-19}$$

15

$$C10 = -0.302052 \times 10^{-24}$$

Fourth surface

$$\kappa = 0.000000$$

$$C4 = -0.276252 \times 10^{-9}$$

20

$$C6 = -0.737257 \times 10^{-15}$$

$$C8 = -0.195497 \times 10^{-20}$$

$$C10 = -0.254863 \times 10^{-25}$$

Fifth surface

25

$$\kappa = 0.000000$$

$$C4 = +0.778078 \times 10^{-9}$$

$$C6 = +0.484140 \times 10^{-14}$$

$$C8 = -0.845350 \times 10^{-20}$$

$$C10 = +0.284273 \times 10^{-24}$$

5 Sixth surface

$$\kappa = 0.000000$$

$$C4 = +0.485099 \times 10^{-8}$$

$$C6 = +0.187224 \times 10^{-13}$$

$$C8 = -0.425640 \times 10^{-18}$$

10 $C10 = +0.134780 \times 10^{-22}$

Seventh surface

$$\kappa = 0.000000$$

$$C4 = +0.193592 \times 10^{-7}$$

15 $C6 = +0.173237 \times 10^{-13}$

$$C8 = -0.116130 \times 10^{-16}$$

$$C10 = -0.324515 \times 10^{-20}$$

Eighth surface

20 $\kappa = 0.000000$

$$C4 = +0.462096 \times 10^{-9}$$

$$C6 = +0.596479 \times 10^{-14}$$

$$C8 = +0.618751 \times 10^{-19}$$

$$C10 = +0.127103 \times 10^{-23}$$

25 [0053]

Fig. 13 is a view showing coma generated by the

projection optical system of the sixth example embodiment. Fig. 13 shows meridional coma and sagittal coma at image heights of 100%, 97%, and 94%,

5 even the sixth embodiment verifies that the coma is excellently corrected in the same way as in the first to fifth embodiments. Also, not being shown here, though, it is also verified that aberrations other than the coma are excellently corrected.

10 [0054]

Furthermore, as shown in Fig. 4, field stop S for defining an effective exposure field on wafer 7 and an effective illuminating field on mask 4 can be arranged at a position optically conjugate to the exposure
15 surface of wafer 7 and the pattern surface of mask 4 along the optical path of projection optical system 6. In this case, the similar field stop may be arranged along the optical path of illumination optical system 3, and concurrently, field stop S may be arranged along the
20 optical path of projection optical system 6, or without arranging the field stop along the optical path of illumination optical system 3, only field stop S may be arranged along the optical path of projection optical system 6.

25 [0055]

Furthermore, when Fig. 4 is referred to, in projection

optical system 6 of the second embodiment, the distance from the optical axis to a position at which the ray of light, which is reflected at fourth reflecting surface

5 R4 and travels to fifth reflecting surface R5, passes through the virtual extension surface of sixth reflecting surface R6 (which is a virtual surface obtained by extending sixth reflecting surface) is set to be larger than the distance from the optical axis to a position at which the ray of light to be reflected at
10 sixth reflecting surface R6. As a result, the outside diameter of fourth reflector CM 4 (not shown in Fig. 4) having fourth reflecting surface R4 becomes large, and consequently, it is noted that the whole optical system becomes large in terms of the diameter.

15 [0056]

In other words, in projection optical system 6 according to other embodiments other than the second embodiment, the distance from the optical axis to a position at which the ray of light, which is reflected
20 at fourth reflecting surface R4 and travels to fifth reflecting surface R5, passes through the virtual extension surface of sixth reflecting surface R6 (which is a virtual surface obtained by extending sixth reflecting surface) is set to be smaller than the
25 distance from the optical axis to the position at which the ray of light to be reflected at sixth reflecting

surface R6. As a result, the outside diameter of fourth reflector CM 4 (not shown in Fig. 4) having fourth reflecting surface R4 becomes small, and consequently, the whole optical system can be small in terms of the diameter.

[0057]

By illuminating the mask with the illumination system (illuminating process) and exposing the transfer pattern formed on the mask to the photosensitive substrate with the projection optical system (exposure process), the exposure apparatus according to the above-mentioned embodiment can fabricate microdevices (semiconductor devices, image pick-up devices, LCD panel devices, thin-film magnetic heads, etc.). An example of a method of yielding the semiconductor device as the microdevice by forming a predetermined circuit pattern on the wafer or the like as the photosensitive substrate by use of the exposure apparatus of this embodiment will be described below with reference to the flowchart of Fig. 15.

[0058]

In step 301 in Fig. 15, a metal film is evaporated on the wafers in one lot. In next step 302, a photoresist is applied onto the metal film on the wafers in the one lot. Thereafter, in step 303, images of patterns on a mask (reticle) are successively exposed and transferred into respective shot areas on the wafers in the one lot

through the projection optical system, using the exposure apparatus of this embodiment.

[0059]

5 Then, after the photoresist on the wafers in the one lot is developed in step 304, and then the resist patterns are etched on the wafers in the one lot in step 305 as a mask, whereby circuit patterns corresponding to the patterns on the mask are formed in the respective shot areas on the wafer. And then, circuit patterns are
10 further formed on upper layers and the like so that the devices such as the semiconductor device and the like are fabricated. According to the above-mentioned semiconductor device fabrication method, a semiconductor device having a very fine circuit pattern can be yielded
15 with high throughput.

[0060]

The above-mentioned embodiment uses the laser plasma X-ray source as the light source for supplying X-rays, but the present invention is not limited to this, and,
20 for example, synchrotron radiation (SOR) light can be used as exposure light.

[0061]

Moreover, the above-mentioned embodiment applies the present invention to the exposure apparatus having the
25 light source for supplying X-rays, but the present invention is not limited to this, and can be applied to

an exposure apparatus having a light source for supplying wavelength light other than X-rays.

[0062]

5 And moreover, the above-mentioned embodiment applies the present invention to the projection optical system of the exposure apparatus, but the present invention is not limited to this, and can also be applied to other typical projection optical systems.

[0063]

10 [Effect of the Invention]

As described above, in the projection optical system of the present invention, its entrance pupil position is set on the second surface side of the second reflecting surface from the vicinity of the first surface side of the second reflecting surface, so that the sufficient aberration correction can be made between the object surface and the entrance pupil, and consequently, the aberration correction in the whole optical system can be excellently made.

20 [0064]

Furthermore, by applying the reflective projection optical system of the present invention, the X-ray can be used as the exposure light. In this case, the pattern of the mask is projected and exposed onto the photosensitive substrate while moving the mask and the photosensitive substrate relative to the projection

optical system. As a result, the high-precision microdevices can be fabricated under the excellent exposure conditions by using the scanning exposure apparatus having the high resolution.

5 [Brief description of the drawings]

Fig. 1 is a diagram schematically showing the structure of the exposure apparatus according to the example embodiment of the present invention.

10 Fig. 2 is a diagram showing the structure of the projection optical system of the first example embodiment of the example embodiments.

Fig. 3 is a view showing coma in the projection optical system of the first example embodiment.

15 Fig. 4 is a diagram showing the structure of the projection optical system of the second example embodiment of the example embodiments.

Fig. 5 is a view showing coma in the projection optical system of the second example embodiment.

20 Fig. 6 is a diagram showing the structure of the projection optical system of the third example embodiment of the example embodiments.

Fig. 7 is a view showing coma in the projection optical system of the third example embodiment.

25 Fig. 8 is a diagram showing the structure of the projection optical system of the fourth example embodiment of the example embodiments.

Fig. 9 is a view showing coma in the projection optical system of the fourth example embodiment.

Fig. 10 is a diagram showing the structure of the projection optical system of the fifth example embodiment of the example embodiments.

Fig. 11 is a view showing coma in the projection optical system of the fifth example embodiment.

Fig. 12 is a diagram showing the structure of the projection optical system of the sixth example embodiment of the example embodiments.

Fig. 13 is a view showing coma in the projection optical system of the sixth example embodiment.

Fig. 14 is a diagram for explaining the conditional expression (1) of the present invention.

Fig. 15 is a diagram showing the flowchart about one example of methods of yielding the semiconductor devices as the microdevices.

[Description of the codes]

- 1 LASER PLASMA X-RAY SOURCE
- 2 WAVELENGTH-SELECTIVE FILTER
- 3 ILLUMINATION OPTICAL SYSTEM
- 4 MASK
- 5 MASK STAGE
- 6 PROJECTION OPTICAL SYSTEM
- 7 WAFER
- 8 WAFER STAGE

CM 1 TO CM 8 REFLECTOR

R 1 TO R 8 REFLECTING SURFACE

S FIELD STOP

Fig. 15

5 START

STEP 301 METAL FILM IS EVAPORATED ON WAFER

STEP 302 APPLY PHOTORESIST ON METAL FILM

STEP 303 TRANSFER RETICLE PATTERN IMAGE INTO EACH
SHOT AREA ON WAFER

10 STEP 304 DEVELOP PHOTORESIST ON WAFER

STEP 305 ETCH RESIST PATTERN ON WAFER AS MASK